

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



**SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO
GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE GENERAL

1. MEMORIA DESCRIPTIVA

➤ Anexos a la memoria

1.1. Estudio previo

1.1.1 Anexo N°1. Introducción a los vehículos híbridos y eléctricos

1.1.2 Anexo N°2. Problemática en las baterías de ión-litio

1.1.3 Anexo N°3. Estudio justificativo de la solución adoptada

1.1.4 Anexo N°4. Supercondensadores

1.1.5 Anexo N°5. Estudio de impacto medioambiental

1.2. Aplicación práctica

1.2.1 Anexo N°6. Solución adoptada para el sistema de potencia

1.2.2 Anexo N°7. Convertidores CC/CC para sistema MES-AES

1.2.3 Anexo N°8. Desarrollo del sistema de potencia

1.2.4 Anexo N°9. Análisis de las estrategias de control

1.2.5 Anexo N°10. Desarrollo del algoritmo de control

1.2.6 Anexo N°11. Simulaciones y validación del algoritmo

1.2.7 Anexo N°12. DSP y código del programa de control

1.2.8 Anexo N°13. Circuitos de acondicionamiento y control

1.2.9 Anexo N°14. Fuente de alimentación auxiliar



2. PLANOS

3. PRESUPUESTO

4. PLIEGO DE CONDICIONES

5. ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA

6. BIBLIOGRAFÍA

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



**SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO
GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

ANEXOS A LA MEMORIA

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ANEXO Nº1

ESTUDIO PREVIO:

**INTRODUCCIÓN A LOS VEHÍCULOS
HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS**

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1.	EL VEHÍCULO ELÉCTRICO. INTRODUCCIÓN: HISTORIA, VENTAJAS E INCONVENIENTES..	2
2.	EL VEHÍCULO HÍBRIDO	4
2.1.	Características de un vehículo híbrido y eléctrico	6
3.	DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA. SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS E HÍBRIDOS	7
3.1.	MES (Main Energy System)	7
3.2.	AES (Auxiliar Energy System)	7
3.3.	Topologías de vehículos híbridos.....	8
3.3.1.	Paralelos.....	8
3.3.2.	Serie	8
3.3.3.	Sistema combinado.....	9
4.	CONCLUSIONES.....	9



1. EL VEHÍCULO ELÉCTRICO. INTRODUCCIÓN: HISTORIA, VENTAJAS E INCONVENIENTES

El concepto de vehículo eléctrico no es algo nuevo, surgido en los últimos años. De hecho el primer modelo data de 1839 y es anterior al motor de combustión interna de cuatro tiempos, patentado en 1886.

En los inicios del siglo XX, los vehículos eléctricos llegaron incluso a tener cierta popularidad. Sin embargo, a partir de 1920 el vehículo de combustión interna comenzó a mejorar claramente sus prestaciones, dejando a los vehículos eléctricos en el olvido.

No obstante, a raíz del desarrollo de la conciencia medioambiental y ante los problemas de contaminación en las grandes ciudades y la crisis del petróleo, los vehículos eléctricos vuelven a cobrar importancia en la década de 1970.

Actualmente el VE sigue sin poder competir directamente con el motor de combustión, tecnología mucho más desarrollada y con años de experiencia. Sus principales desventajas son las siguientes, y derivan fundamentalmente de las limitaciones de la batería:

- Alto coste de adquisición. Debido al mayor coste de las baterías más avanzadas, muchas aún en investigación; y debido también a su bajo volumen de producción. Esta circunstancia puede compensarse en ocasiones con subvenciones estatales, exención del impuesto de matriculación, así como con el posterior ahorro en combustible.
- Tiempo de recarga. De varias horas en comparación con los cinco minutos que podemos tardar en llenar un depósito de combustible. Actualmente también se está estudiando cómo reducirlo: sistemas de recarga rápida, recarga inductiva, sustitución mecánica de las baterías...
- Baja autonomía. Constituye el problema más importante. Y es que la energía almacenable como combustible líquido supera ampliamente a la que actualmente pueden albergar un paquete de baterías razonable. A esto hay que sumarle la falta de infraestructuras para su recarga.



Para mejorar este último aspecto, se sigue trabajando en innovaciones para el chasis, aerodinámica y en reducción del peso, teniendo en cuenta que se deben seguir manteniendo las condiciones y requisitos de seguridad.

Si bien estas mejoras también ayudarían el vehículo de combustión, el eléctrico se vería más beneficiado al conseguir aumentar su autonomía, que es su punto más débil. Pese a todo, la cuestión principal sigue estando en el desarrollo de baterías de una mayor densidad energética.

Por otro lado, el vehículo eléctrico también presenta ciertas ventajas frente al de combustión:

- Son más eficientes y permiten un ahorro en combustible, dado el elevado precio de los combustibles fósiles.
- Su motor es más longevo y sencillo, al menos mecánicamente.
- Requiere un menor mantenimiento, ya que se reducen en gran medida el uso de aceites y lubricantes.
- Poseen una mejor regulación del par y velocidad, así como una respuesta más inmediata, pudiendo tener una mayor estabilidad en las curvas. Esto también se traduce en un mayor confort en la conducción.
- El motor eléctrico apenas hace ruido, reduciendo la contaminación acústica.
- Permiten recuperar energía durante el frenado.
- Las baterías pueden ser reciclables.
- Libre de emisiones locales. Aunque parte de la electricidad para recargar las baterías provenga de energías contaminantes, globalmente producen menos CO₂. También se están planteando estaciones de recarga basadas exclusivamente en energías renovables.

Debido al hecho de que no contaminan directamente, esto los hace ideales para ambientes urbanos, donde su baja autonomía no es un factor demasiado determinante. Así pues, su uso más extendido se encuentra en:



- Coches urbanos. Para desplazamiento en el núcleo urbano o a extrarradios.
- Vehículos de flota. Por ejemplo en furgonetas para el transporte de mercancías ligeras, ya que disponen de un mayor espacio para las baterías.
- Autobuses urbanos. Ya que los trayectos son cortos, y las paradas pueden aprovecharse para recargar la batería.
- Camiones de basura. Un servicio fundamentalmente nocturno, donde la reducción del ruido es un factor deseable.
- Motocicletas eléctricas. Ya que suponen un menor coste de inversión en comparación a los coches eléctricos.
- Bicicletas eléctricas. Proporcionan asistencia mientras se pedalea, ayudando al desplazamiento de la misma y sin llegar a alcanzar velocidades altas.

2. EL VEHÍCULO HÍBRIDO

Como hemos visto, pese a que el vehículo eléctrico se desenvuelva medianamente bien en ambientes urbanos, resulta evidente que todavía no puede competir con el vehículo de combustión, sobre todo cuando se prevén desplazamientos cercanos o superiores a su autonomía.

Por este motivo surgen los vehículos híbridos, que buscan combinar las características de ambos vehículos, aprovechando sus puntos fuertes y tratando de reducir sus debilidades. De esta forma se trata de conseguir vehículos con una mayor autonomía que los eléctricos y que a su vez contaminen menos que los de combustión. Si ordenamos los vehículos en función de su dependencia del motor de combustión tenemos:

➤ Vehículo convencional

Funciona con el motor de combustión típico. El proceso no solo genera CO₂, si no otros componentes como el dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno.

➤ Vehículo híbrido convencional (HEV)

Combina el motor de combustión con el motor eléctrico. Este tipo de vehículo utiliza el mismo combustible que un automóvil convencional, siendo compatible con la



infraestructura actual y sin ser conectable a la red, por lo que sigue siendo contaminante. Seguramente es el que tiene un mayor futuro a corto plazo.

En este tipo de vehículos la batería no almacena gran cantidad de energía, si no que se usa para ciclos de carga descarga, ayudando en la aceleración y permitiendo el frenado regenerativo, pudiendo reducir el consumo en un 20-40 %.

➤ Vehículo híbrido enchufable (PHEV)

Tiene la capacidad de conectarse a la red. Sigue empleando un motor de combustión, lo cual permite aumentar la autonomía cuando las baterías se agotan.

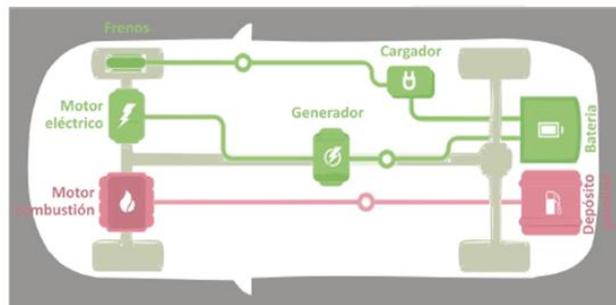


Figura 1.1. Vehículo híbrido enchufable

➤ Vehículos eléctricos de autonomía extendida (EREV)

Semejantes al anterior, la diferencia está en que el motor de combustión interna no mueve el vehículo, si no que recarga las baterías a través de un alternador cuando se detecta que estas van a agotarse. Como podemos ver en la Figura 1.2. el vehículo se mueve exclusivamente por el motor eléctrico, por lo que sus baterías serán más exigentes.

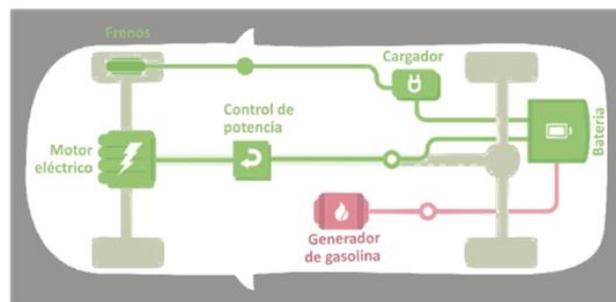


Figura 1.2. Vehículo eléctrico de autonomía extendida

De esta forma, utilizando las dos fuentes de energía consiguen una mayor autonomía que un vehículo eléctrico convencional.



➤ Vehículo eléctrico puro (VE)

Obtiene la energía de uno o más motores eléctricos, sin depender de ningún motor de combustión, presentando las ventajas e inconvenientes que se han explicado.

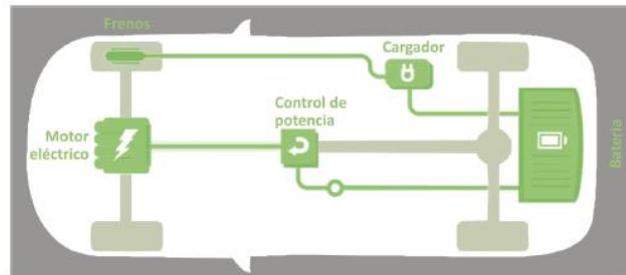


Figura 1.3. Vehículo eléctrico de batería

2.1. Características de un vehículo híbrido y eléctrico

Las características fundamentales que definen estos vehículos son las siguientes:

- La energía específica de sus baterías (expresada en kWh/kg), lo que nos da una idea de su autonomía.
- La potencia específica que pueden desarrollar (expresada en W/kg), lo que nos da una idea de su capacidad de aceleración y su respuesta en fuertes pendientes.

También será importante la capacidad del vehículo para recuperar la energía durante el frenado regenerativo. Otro factor a tener en cuenta es la vida útil estimada de las baterías.

Actualmente no existen dispositivos que posean ambas características: una alta capacidad de almacenamiento de energía junto a una gran capacidad para el desarrollo de potencia. Es por este motivo por lo que se necesitan dos sistemas diferentes, uno para el almacenamiento de energía y otro para el aporte de potencia, problemática que es el tema principal de este trabajo.



3. DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA. SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS E HÍBRIDOS

El sistema MES-AES se basa en dos dispositivos diferentes para el almacenamiento de energía (energía eléctrica, en este proyecto). A continuación se describen las características fundamentales de cada uno de ellos.

3.1. MES (Main Energy System)

Es el sistema de energía principal. Tiene una alta capacidad de almacenamiento de energía (alta energía específica en kWh/kg) mientras que posee una baja potencia. La autonomía de nuestro vehículo dependerá fundamentalmente de la capacidad del sistema MES.

Hasta ahora el sistema MES estaba basado en el combustible utilizado para la combustión (gasolina, diésel, etc.), pero ahora están buscándose otras alternativas: turbinas de gas, células de combustible, baterías con alta energía específica...

Un vehículo híbrido podría funcionar únicamente con el MES, pero lo haría a velocidades no demasiado elevadas, sin ser capaz de desarrollar una potencia alta de forma eficiente.

3.2. AES (Auxiliar Energy System)

Es el sistema de energía auxiliar. Es el que nos proporciona la potencia (alta potencia específica en W/kg) y nos permite acelerar rápidamente y alcanzar altas velocidades. Además este sistema posee mayor capacidad para regenerarse durante el frenado. Sin embargo, la cantidad total de energía que puede almacenar es inferior a la que dispone el MES, por lo que un vehículo no puede funcionar durante mucho tiempo usando exclusivamente el sistema AES.

Existen varias posibilidades para cubrir este sistema. Por ejemplo baterías de alta potencia de ion de litio, o de níquel e hidruro metálico (NiMH). Otra opción serían los supercondensadores, volantes de inercia y otros sistemas que se trataran y analizarán en el anexo N°3, *Estudio Justificativo de la Solución Adoptada*.

Como se puede deducir, para que un vehículo híbrido o eléctrico funcione correctamente, los sistemas MES y AES deben trabajar de forma conjunta y coordinada, aportando energía a largo plazo y potencia instantánea, respectivamente.



3.3. Topologías de vehículos híbridos

Relacionado con los sistemas MES y AES, y atendiendo a su forma de propulsión, podemos distinguir diferentes topologías para los vehículos híbridos.

3.3.1. Paralelos

En este tipo de híbridos, los dos sistemas mecánicos trabajan en paralelo. Existen dos opciones.

- A) Cada sistema mecánico mueve las ruedas traseras y delanteras independientemente.
- B) Los dos sistemas mueven las mismas ruedas, usando una caja de cambios especial. Este es el sistema más utilizado en los vehículos híbridos convencionales, utilizando un motor de combustión como MES y un sistema eléctrico como AES, como puede verse en la Figura 2.a.

3.3.2. Serie

Constan de un solo sistema mecánico. Es utilizado en aquellos vehículos que emplean exclusivamente la propulsión eléctrica. La energía puede recibirse de dos o más fuentes eléctricas (siendo estas compatibles), de forma semejante a como se ve en la Figura 2.b.

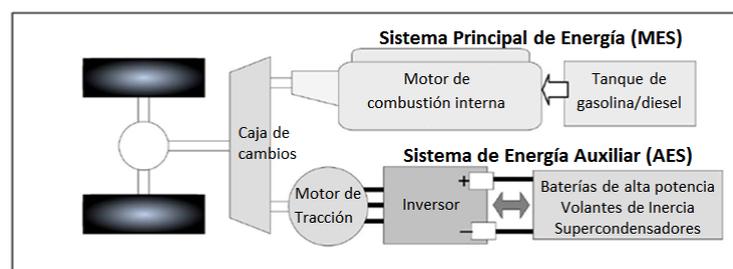


Figura 2.a. Híbrido paralelo

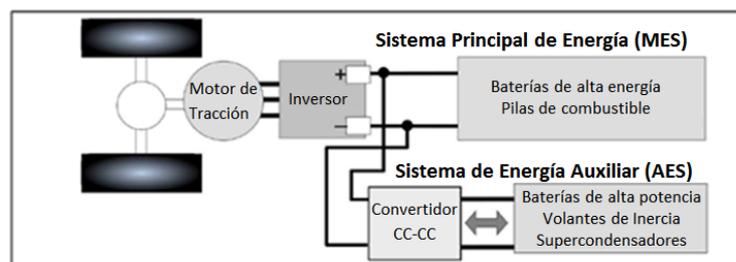


Figura 2.b. Híbrido serie



3.3.3. Sistema combinado

Usando el sistema serie eléctrico a bajas velocidades (por ejemplo en ciudad, sin emisiones contaminantes) y utilizando el sistema de propulsión en paralelo a velocidades mayores, que requieran el apoyo del motor de combustión. Este sistema puede conectarse y desconectarse manualmente, o bien ser automático.

4. CONCLUSIONES

Dado que el vehículo convencional, dependiente de los combustibles fósiles está comenzando a presentar serios inconvenientes, tanto económicos como medioambientales, los vehículos híbridos y eléctricos están cobrando una mayor importancia.

Para funcionar de forma óptima, estos vehículos eléctricos e híbridos necesitan de un sistema principal de energía (MES), que proporcione una gran autonomía, así como de un sistema auxiliar de energía (AES) que proporcione altas potencias para realizar aceleraciones y frenados regenerativos.

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ANEXO N°2

ESTUDIO PREVIO:

PROBLEMÁTICA EN LAS BATERÍAS DE IÓN-LITIO

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. EVOLUCIÓN DE LAS BATERÍAS DE LITIO. TECNOLOGÍA ACTUAL Y EN DESARROLLO	2
3. EFECTOS NEGATIVOS EN LAS BATERÍAS DE LITIO	5
3.1. Efectos negativos en la carga excesiva	5
3.2. Efectos negativos sobre la batería como consecuencia de cargas y descargas en condiciones extremas	6
3.2.1. Efectos negativos. Altas corrientes de carga	6
3.2.2. Efectos negativos. Altas corrientes de descarga.....	7
4. CONCLUSIONES.....	9



1. INTRODUCCIÓN

Las baterías de litio se empezaron a comercializar a partir de 1990. Desde entonces, sus prestaciones y precios han mejorado considerablemente, extendiéndose su uso a móviles y portátiles, así como a los vehículos con motores eléctricos.

Las baterías de litio tienen una mayor energía específica que otras tecnologías, además tienen un mayor rendimiento y no presentan efecto memoria.

Tabla 1. Energía específica y densidad energética

	Energía específica (Wh/kg)	Densidad energética (Wh/l)
Gasolina	12200	9700
Litio-ion*	90-130	140-200
Ni-MH	60-70	130-170
Plomo-Ácido	30-45	60-90

*Los valores varían y dependen de la tecnología concreta que se utilice

Sin embargo, como puede verse en la Tabla 1, la autonomía que nos proporciona cualquier tipo de batería sigue siendo limitada. Aunque el rendimiento del vehículo eléctrico sea superior, su autonomía continúa siendo inferior a la obtenida con los combustibles habituales.

Además, pese a las últimas reducciones de precio, la tecnología del litio sigue siendo cara, por lo que deberemos concentrar esfuerzos en aumentar la vida útil de las baterías, si queremos que esta opción continúe siendo rentable y atractiva.

2. EVOLUCIÓN DE LAS BATERÍAS DE LITIO. TECNOLOGÍA ACTUAL Y EN DESARROLLO

Las primeras baterías de litio se desarrollaron en los años 60 y empleaban sulfuro de titanio para el cátodo y metal del litio para el ánodo. Posteriormente comenzó a emplearse grafito, que resultaba mucho más eficiente como ánodo que el metal de litio, además de ser mucho más estable y seguro. Más tarde empezó a emplearse el cobalto para el cátodo (LiCoO_2), comenzándose su comercialización a partir de 1991.

Las diferentes tecnologías posibles para una batería de litio son las siguientes:



- Baterías de Litio-Titanio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$).

Pueden soportar un mayor número de ciclos carga-descarga que el resto (hasta 12.000 ciclos). No obstante, su densidad energética es baja (65-100 Wh/kg) y su coste muy elevado.

- Baterías de Litio-Cobalto (LiCoO_2).

Fueron las primeras en ser comercializadas y siguen estando muy extendidas en dispositivos móviles (teléfonos, portátiles, etc.). Tienen un precio mucho más asequible que las anteriores y una buena densidad energética (170-185 Wh/kg).

Sin embargo solo soportan 500 ciclos de carga-descarga y en caso de accidente podrían generar reacciones peligrosas, por lo que no son una buena opción para el vehículo eléctrico.

- Baterías de Litio-Manganeso (LiMn_2O_2)

Son más estables térmicamente, menos contaminantes y soportan más tensión por celda que las de cobalto. Sin embargo, su densidad energética es menor (en torno a 90-110 Wh/kg).

- Baterías de Litio-Hierro-Fosfato (LiFePO_2)

No tienen una densidad energética alta (90-125 Wh/kg) pero son de las más seguras, con una estabilidad térmica y química superior. Además son la más baratas (junto a las de cobalto), soportan hasta 2.000 ciclos de recarga y admiten mayores tasas de carga y descarga. Por estas razones este tipo de baterías de litio pueden ser una buena opción a corto plazo para vehículos híbridos y eléctricos.

- Baterías de Litio-Níquel-Cobalto-Manganeso ($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$)

Se basan en una mezcla denominada NMC, basada en níquel, manganeso y cobalto. Tienen buena densidad energética (155-190 Wh/kg) y alto número de recargas (1.500 ciclos) a un coste razonable. También son una buena opción para los vehículos eléctricos.



- Batería de polímero de litio (LiPo)

En este tipo de baterías el electrolito no se encuentra disuelto en estado líquido, sino en un polímero sólido como el óxido de polietileno o el poliacrilonitrilo.

Poseen una mayor tensión nominal por celda y una mayor densidad energética. Su principal problema es que su voltaje mínimo (3 V) debe respetarse rigurosamente, ya que en caso contrario se causa un daño irreparable a las células. También son válidas para vehículos eléctricos.

- Baterías de litio azufre.

Al igual que las anteriores son baterías que emplean un polímero sólido. Una vez desarrolladas, este tipo de baterías podrían producirse a un bajo coste, siendo bastante estables y duplicando la densidad energética actual (hasta 500 Wh/kg).

- Batería de nanocables.

En estas baterías (aún en desarrollo) se sustituye el ánodo de grafito por un ánodo de nanocables de silicio. Empleando estos nanocables se puede aumentar el área superficial y almacenar mayor cantidad de energía. Además estas baterías conservan un 85 % de su capacidad tras 6000 ciclos, cifra superior a todas las anteriores.

- Litio-aire.

Empleando el oxígeno del aire como cátodo y aún en investigación, poseen densidades energéticas teóricas semejantes a los combustibles convencionales, permitiendo autonomías de 800 km.

En comparación con otros tipos de baterías, las baterías de litio almacenan mayor energía y apenas presentan efecto memoria, pero en cambio son más sensibles a la temperatura, presentando un mayor riesgo y debiéndose incluir sistemas para garantizar la seguridad.



3. EFECTOS NEGATIVOS EN LAS BATERÍAS DE LITIO

Las baterías de litio presentan una serie de problemas, tanto específicos como inconvenientes globales que afectan a todo tipo de baterías. En concreto, las baterías de litio son muy sensibles a la temperatura y su carga excesiva presenta problemas adicionales, que pueden llevarlas a la explosión. Asimismo, al igual que en el resto de baterías, las altas corrientes de carga y descarga las afectan negativamente, desgastando los elementos que las componen.

3.1. Efectos negativos en la carga excesiva

En el proceso de carga de una batería de litio, visible en la Figura 1, podemos distinguir 4 fases:

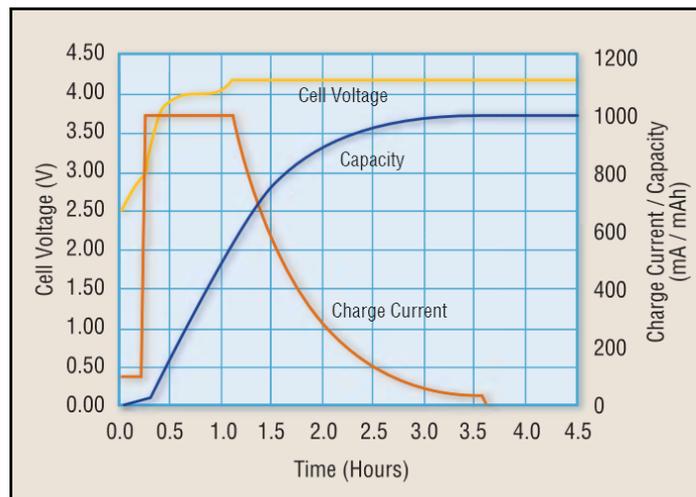


Figura 1. Proceso de carga de una batería de litio

1. Carga de mantenimiento. Se realiza a una corriente baja (0,1C). Tiene como objetivo restaurar las células más empobrecidas, cuya tensión ha caído por debajo del umbral mínimo.
2. Carga a intensidad constante. Se realiza entre 0,2C y 1C. No conviene realizarla a mayor corriente, ya que entonces se eleva demasiado la tensión.
3. Carga a tensión constante. Evitando que el voltaje de las células se eleve demasiado. La corriente se va reduciendo según nos acercamos al final de la carga.



4. Desconexión. La carga debe terminarse, para ello se pueden emplear diferentes métodos; controlando la corriente, tiempo, tensión, presión, temperatura interna...

No se debe seguir cargando la batería. Si se encuentra ya cargada (ej. 4,2 V) y se sigue cargando más (4,3 V) pueden generarse placas de litio metálico. Esta situación debe evitarse, ya que estas placas hacen inestables a la batería, pudiendo producirse la siguiente reacción.



Como se ve en la ecuación 1, el litio metálico reacciona con el agua produciendo hidrógeno, que es inflamable. Además la reacción es exotérmica, lo que se traduce en un peligro de inflamación y explosión de la batería. Estas placas de litio sólido también se producen con la carga habitual, si esta se produce a bajas temperaturas. En la práctica las baterías de litio trabajan con una tolerancia de $\pm 0,05V$ por celda.

Por último, en diferentes aplicaciones la carga debe volver a realizarse cada cierto tiempo (1 hora por cada 500h, aproximadamente cada 20 días), compensando de esta forma la auto descarga y evitando que el voltaje de las células decaiga demasiado.

3.2. Efectos negativos sobre la batería como consecuencia de cargas y descargas en condiciones extremas

3.2.1. Efectos negativos. Altas corrientes de carga

Como hemos visto, las baterías se basan en procesos químicos, cuyas reacciones se producen a una determinada velocidad. Al aumentar la corriente de carga se fuerzan estos procesos, generándose calor.

El aumento de temperatura genera gasificación, disminuye el electrolito, corroe los terminales, deforma los elementos, etc. En definitiva, inutiliza la batería, afectando a su rendimiento, capacidad, auto descarga y longevidad.

Una alta corriente de carga no solo acorta la vida útil de las baterías a largo plazo, también puede quemarlas y en algunos casos (baterías de litio) incluso llevarlas a la explosión. Esto puede suceder debido a la anteriormente mencionada reacción del litio metálico, o también producirse mediante embalamiento térmico.



Este fenómeno consiste en que al aumentar la temperatura, aumenta también la reacción química exotérmica que se da en las baterías, produciendo más calor y realimentando positivamente el proceso. El aumento de temperatura disminuye también la resistencia interna, aumentando la corriente, lo que genera aún más calor. Esta escalada térmica se produce a partir de los 130°C para las baterías de litio basadas en Cobalto, y a partir de 250°C para las basadas en Manganeso.

Debido a todo esto los fabricantes utilizan diferentes sistemas para proteger las baterías, manteniendo bajo control la tensión y temperatura.

Llevando todo lo anterior a nuestro caso particular, si la batería de nuestro vehículo estuviese cargada y obtuviese una energía extra de un frenado regenerativo, con una corriente alta como la calculada en el anexo N°3 (en torno a 200 A), la tensión y la temperatura aumentarían, así como la formación de placas de litio metálico, pudiendo llevar todo ello a su destrucción (ver Figura 2).



Figura 2. Incendio de la batería de litio de un ordenador portátil

3.2.2. Efectos negativos. Altas corrientes de descarga

La capacidad de una batería viene dada en Ah, los cuáles se encuentran medidos en unas determinadas condiciones. Si se le exige una mayor corriente a una batería, no obtendremos la misma capacidad, si no menor.

Siguiendo el ejemplo de la Figura 3. Tenemos una batería que proporciona 1A durante 150 horas. Calculamos su capacidad en esas condiciones:

$$1 A \cdot 150h = 150 Ah \quad (2)$$

Si se le exigen 10A podríamos deducir que duraría 15 horas, sin embargo esta cifra se reduce ligeramente (10 horas, según la Figura 3).



$$10 A \cdot 10h = 100 Ah \quad (3)$$

Observando las ecuaciones 2 y 3, vemos como al hacer trabajar a la batería con una corriente mayor su capacidad se ha reducido hasta en un 33 %. Esto es debido a que a corrientes superiores, una mayor parte de la energía se pierde en forma de calor.

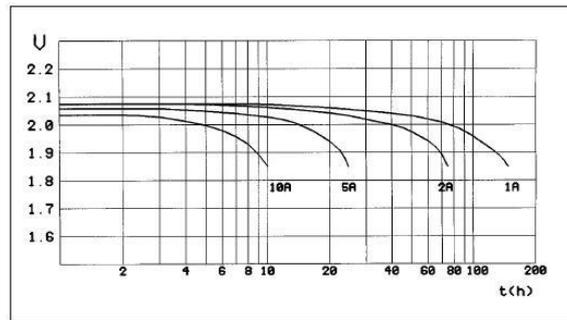


Figura 3. Curvas de descarga de una batería

Resumiendo, para 1C (corriente nominal) obtenemos más Ah totales que para 3C (tres veces la corriente nominal) y menos que para 0,1C (diez veces menos la corriente nominal). Además, como puede verse en las Figura 3, 4 y 5, la tensión de la batería también se ve influida por la corriente de carga o descarga, lo que también afectará a la potencia que puede desarrollar o regenerar.

Discharge Characteristic Curves : Standard Batteries

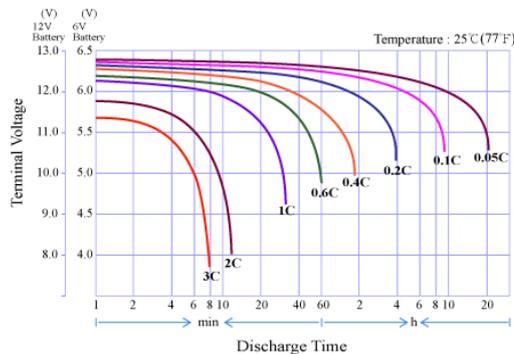


Figura 4. Curvas de descarga respecto a la corriente nominal

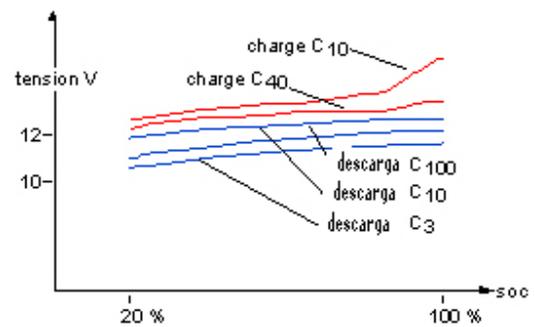


Figura 5. Curvas de carga y descarga

Por otro lado, una corriente de descarga alta no solo reduce la capacidad total, ya que como hemos dicho el aumento de temperatura también provoca gasificación, corrosión de terminales, etc. Por lo tanto, también reducen la vida útil de la batería. Asimismo y a diferencia de otros tipos de baterías, no es conveniente descargar por completo una batería de litio, ya que apenas presentan efecto memoria. En la



práctica, las células que componen las baterías no son idénticas. Si una célula se descarga antes que la otra y el resto continúan cargadas y seguimos exigiendo corriente, podemos llegar a dañar esa célula, perdiendo parte de la energía total proporcionable por la batería.

Por este motivo, los fabricantes dan un determinado valor de profundidad de descarga (DOD), el cuál no debe superarse, ya que en caso contrario se reduce la vida útil de la batería. Se considera que la vida de una batería está llegando a su fin cuando su capacidad o potencia baja del 80% de sus prestaciones iniciales.

Como vemos en las Figura 6 y 7, si la DOD es mayor, la vida útil se acorta. Si además la carga y descarga se realiza en un tiempo menor (exigiendo mayores corrientes a la batería), el tiempo de vida útil se acorta aún más.



Figura 6. Reducción de la vida útil a DOD constante

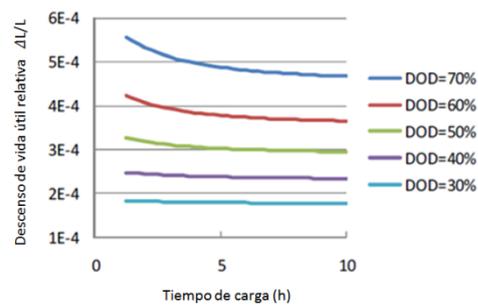


Figura 7. Reducción del tiempo de vida en función de la DOD y el tiempo de carga y descarga

4. CONCLUSIONES

Resumiendo la problemática de las baterías de ión-litio en los vehículos eléctricos:

- Por varios motivos, las altas temperaturas son perjudiciales para las baterías. Las temperaturas demasiado bajas son también nocivas.
- Las corrientes demasiado elevadas, tanto de carga (frenados) como de descarga (aceleraciones) son también dañinas. Disminuyen la duración en Ah de la batería y además generan calor y acortan su vida útil a largo plazo.
- Si la batería se encuentra cargada y recibe más energía como consecuencia de un frenado regenerativo, el litio metálico generado puede llevar a las baterías incluso hasta la explosión.

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ANEXO N°3

ESTUDIO PREVIO:

**ESTUDIO JUSTIFICATIVO DE LA
SOLUCIÓN A ADOPTAR**

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1.	SISTEMA AES. INTRODUCCIÓN, EXIGENCIAS Y NECESIDADES	2
1.1.	Exigencias de corriente actuales sobre las baterías	2
1.1.1	Aceleración.....	2
1.1.2	Frenado regenerativo. Frenado moderado	3
1.1.3	Frenado regenerativo. Frenado de emergencia	4
2.	IMPORTANCIA DEL FRENADO REGENERATIVO	5
2.1.	Estimación del aumento de la autonomía	6
3.	ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE LA SOLUCIÓN	8
3.1.	Introducción.....	8
	o Conclusión del estudio de la problemática.....	9
3.2.	Solución a establecer. Objetivos a cumplir.....	9
3.3.	Posibles soluciones	10
3.3.1	Posibles soluciones al Sistema MES.....	10
	➤ Baterías ZEBRA.....	10
	➤ Baterías de Zinc-Aire	10
	➤ Pilas de combustible	11
3.3.2	Posibles soluciones al Sistema AES.....	12
	➤ Baterías avanzadas.....	12
	➤ Volante de Inercia	13
	➤ Sistema SMES.....	14
	➤ Supercondensadores	15
3.4.	CONCLUSIONES.....	15
3.4.1	Solución elegida para el sistema MES.....	15
3.4.2	Solución elegida para el sistema AES.....	16



1. SISTEMA AES. INTRODUCCIÓN, EXIGENCIAS Y NECESIDADES

Como hemos explicado, el sistema AES es el encargado de proporcionar la potencia necesaria para la aceleración del vehículo. También es el encargado de recuperar la energía durante el frenado regenerativo.

Ahora bien, dejando a un lado vehículos como la bicicleta y la motocicleta, que son vehículos ligeros y que muchas veces no alcanzan altas velocidades, la mayoría son máquinas pesadas (coches, furgonetas, camiones), almacenan una gran cantidad de energía cinética con la velocidad, la cual debe ser asumida por el sistema AES.

Para comprender mejor el problema, realizaremos un pequeño cálculo de las exigencias actuales sobre la batería durante las aceleraciones y frenados.

1.1. Exigencias de corriente actuales sobre las baterías

Para el cálculo vamos a utilizar un vehículo de 1400 kg, con una eficiencia del 80 % en el uso de la energía de la batería.

1.1.1 Aceleración

Vamos a suponer que el vehículo accede a una autovía a una velocidad inicial de 40 km/h y desea alcanzar una velocidad más adecuada de 100 km/h en un tiempo razonable, de 7 segundos.

Primero vamos a calcular el incremento de energía cinética.

$$v_1 = 40 \text{ km/h} = 11,1 \text{ m/s} \quad E_{C1} = \frac{1}{2}mv_1^2 = 86\,420 \text{ J} \quad (1.1)$$

$$v_2 = 100 \text{ km/h} = 27,8 \text{ m/s} \quad E_{C2} = \frac{1}{2}mv_2^2 = 540\,123 \text{ J} \quad (1.2)$$

$$\Delta E_c = E_{C2} - E_{C1} = 453\,704 \text{ J} \quad (1.3)$$

Aplicando el rendimiento calcularemos la potencia y la intensidad necesaria. Supondremos una batería de 360 V, una de las tensiones más altas con las que trabajan los vehículos actuales, buscando reducir la corriente.



$$E_{\text{aceleración}} = \frac{\Delta E_c}{\eta} = \frac{454\,741\text{ J}}{0,8} = 568\,426\text{ J} \quad (1.4)$$

$$P_{\text{aceleración}} = \frac{E_{\text{aceleración}}}{t} = \frac{568\,426\text{ J}}{7\text{ s}} = 81\,019\text{ W} \quad (1.5)$$

$$I_{\text{aceleración}} = \frac{P_{\text{aceleración}}}{V} = \frac{81\,019\text{ W}}{360\text{ V}} = 225\text{ A} \quad (1.6)$$

Como vemos en la Ecuación 1.6, aun empleando una tensión elevada, la corriente media que se le exige aportar a la batería durante la aceleración es muy alta.

1.1.2 Frenado regenerativo. Frenado moderado

Vamos a suponer ahora que nuestro vehículo circula a 100 km/h y que tenemos que reducir su velocidad a 50 km/h. Este frenado se realizará de forma lenta y moderada durante 6 segundos. Siguiendo el mismo procedimiento anterior:

$$v_1 = 100 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 27,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad E_{C1} = \frac{1}{2} m v_1^2 = 540\,123\text{ J} \quad (1.7)$$

$$v_2 = 50 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 12,9 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad E_{C2} = \frac{1}{2} m v_2^2 = 135\,030\text{ J} \quad (1.8)$$

$$\Delta E_c = E_{C2} - E_{C1} = -405\,092\text{ J} \quad (1.9)$$

En este caso el rendimiento del sistema impide absorber toda la energía, tan solo un 80 % de ella.

$$E_{\text{aprovechable}} = \Delta E_c \cdot \eta = -405\,092\text{ J} \cdot 0,8 = -324\,074\text{ J} \quad (1.10)$$

$$P_{\text{frenado}} = \frac{E_{\text{frenado}}}{t} = \frac{-324\,074\text{ J}}{6\text{ s}} = -54\,012\text{ W} \quad (1.11)$$

$$I_{\text{frenado}} = \frac{P_{\text{frenado}}}{V} = \frac{-54\,012\text{ W}}{360\text{ V}} = -150\text{ A} \quad (\text{Corriente absorbida}) \quad (1.12)$$

Como vemos en la Ecuación 1.12, el valor de corriente que necesita absorber la batería durante un frenado también es alto. Y será aún mayor ante un frenado de emergencia realizado a una velocidad muy alta.



Las elevadas corrientes de carga (frenados) y descarga (aceleraciones) de las baterías producen una disminución de su vida útil, como se ha explicado en el anejo N°3 *Problemática de las Baterías de ión-litio*.

1.1.3 Frenado regenerativo. Frenado de emergencia

Para saber qué requisitos requiere un frenado de emergencia consultamos los datos de seguridad vial. Cuando se conduce en un circuito urbano se recomienda una distancia de seguridad de 2 segundos y en carretera abierta aumenta hasta al menos 3 segundos, debiéndose de aumentar la distancia en condiciones adversas (mala visibilidad, niebla, lluvia, suelo mojado, etc.).

El peor caso se dará cuando debemos frenar rápidamente a una velocidad muy alta (120 km/h). A esa velocidad el coche recorre 33 m por segundo. Considerando que se hayan respetado los 3 segundos de distancia de seguridad disponemos de un total de $33\text{m/s} \cdot 3\text{s} \approx 100$ metros para pisar el freno y detener el vehículo. El tiempo de reacción varía dependiendo del tipo de persona, pero en condiciones normales no debería ser mayor a 1 segundo.

Por lo tanto, el vehículo circulando a 120 km/h debe detenerse en 2 segundos (60 m). Los actuales sistemas de frenado ABS permiten detener el vehículo en condiciones semejantes, alcanzando frenados superiores a -10m/s^2 .

De forma semejante al apartado anterior, calculamos los requisitos de corriente sobre la batería:

$$v_1 = 100 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 27,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad E_{C1} = \frac{1}{2} m v_1^2 = 540\,123 \text{ J} \quad (1.13)$$

$$v_2 = 0 \quad E_{C2} = 0 \Rightarrow \Delta E_c = E_{C2} - E_{C1} = -540\,123 \text{ J} \quad (1.14)$$

$$E_{\text{aprovechable}} = \Delta E_c \cdot \eta = -135\,031 \text{ J} \cdot 0,8 = -432\,099 \text{ J} \quad (1.15)$$

$$P_{\text{frenado}} = \frac{E_{\text{frenado}}}{t_{\text{frenado-emergencia}}} = \frac{-432\,099 \text{ J}}{2 \text{ s}} = -216 \text{ kW} \Rightarrow 294 \text{ CV} \quad (1.16)$$

$$I_{\text{frenado}} = \frac{P_{\text{frenado}}}{V} = \frac{-86\,420 \text{ W}}{360 \text{ V}} = -600 \text{ A} \text{ (Corriente absorbida)} \quad (1.17)$$



Como podemos ver en las Ecuaciones 1.16 y 1.17, la potencia y corriente necesarias son muy altas. Las baterías no pueden soportar corrientes regenerativas tan altas. El motor del vehículo eléctrico tampoco puede realizar este esfuerzo regenerativo (los vehículos eléctricos habituales no alcanzan 294 CV). Por lo tanto, ante frenados de emergencia el frenado regenerativo se deberá complementar con el frenado hidráulico convencional, ya que la prioridad no es aprovechar la energía, si no la seguridad.

2. IMPORTANCIA DEL FRENADO REGENERATIVO

Un automóvil convencional utiliza el freno hidráulico, en el que a través del circuito hidráulico, la presión ejercida en el pedal acciona los frenos, que mediante fricción disipan la energía cinética en forma de calor. Los vehículos eléctricos utilizan, complementario al anterior, el **frenado regenerativo**, el cual es vital para aumentar el rendimiento y la autonomía.

En el frenado regenerativo el motor pasa a utilizarse como generador, suministrando a través de un inversor energía a las baterías. Para ello, en el momento en que se deja de pisar el acelerador y se pisa al freno, el sistema de control reduce la frecuencia de trabajo del estator, haciendo trabajar al rotor a una velocidad superior a la del campo, es decir, como generador, según se ve en la Ecuación 2.1. El par que se genera produce el efecto de frenado.

$$n_{1-Estator} < n_{2-Rotor} \Rightarrow s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} < 0 \Rightarrow \text{Generador} \quad (2.1)$$

Normalmente el frenado regenerativo actúa primero, buscando obtener la máxima energía posible. Así pues, no solo permite la recuperación de energía, también disminuye el desgaste de los frenos convencionales. Sin embargo, no puede utilizarse a velocidades demasiado bajas (el par creado no es suficiente para detener el vehículo), ni tampoco cuando la batería se encuentra ya completamente cargada.

También existen otros sistemas para realizar un frenado, como el frenado eléctrico por corrientes de Foucault o el frenado reostático, pero ambos disipan la energía en forma de calor, por lo que no son interesantes en este aspecto.



2.1. Estimación del aumento de la autonomía

Utilizando los mismos supuestos que para los cálculos anteriores (vehículo de 1400 kg con un rendimiento del 80 %), vamos a realizar una estimación de la recuperación de la energía del frenado, cuyos resultados pueden verse en la Tabla 1.

Vamos a suponer un uso en ciudad. El vehículo es acelerado lentamente de 0 a 50 km/h en 7 segundos. Después continuamos a velocidad constante durante 1 minuto. Posteriormente frenamos en 4 segundos ante un semáforo, cruce, etc.

Los cálculos han sido realizados de la misma forma que en las estimaciones anteriores. Nótese que la energía que recuperamos del frenado es menor a la que necesitamos para la aceleración, aunque la variación de velocidad sea la misma, puesto que la eficiencia a la hora de convertir la energía eléctrica en cinética y viceversa es del 80 %.

Mientras se mantiene la marcha no se ha variado la velocidad, pero en la realidad también se debe aportar energía, para vencer las fuerzas de rodadura, la fuerza del viento, etc.

Por lo tanto, para mantener la velocidad de 50 km/h en un vehículo de 1400 kg, hemos considerado necesaria una potencia de aproximadamente 6kW (5,5 CV de rodadura y 2 CV para vencer la resistencia al aire a esa velocidad).

Tabla 1. Estimación del frenado regenerativo

Estimación del frenado regenerativo			
	Tiempo (s)	Potencia (kW)	Energía (kWh)
Aceleración	7	24,1	0,0469
Marcha	60	6	0,1
Frenado	4	-27,0	-0,03
		Ahorro	20,43%

Realizando el cálculo de la tabla:

$$Frenado\ regenerativo = \frac{0,03}{0,1 + 0,0469} \cdot 100 = 20,43\% \quad (2.2)$$

Como vemos en la Ecuación 2.2, el porcentaje de recuperación de energía es considerable. De hecho en algunos casos puede superar el 30 %.



Este porcentaje será mayor o menor en función del tipo de circuito: urbano o no, cantidad de pendientes y paradas, velocidades de la frenada... Si el vehículo circula a mayores velocidades, la recuperación de energía será mayor, pero la creciente resistencia que ofrece el viento nos obligará a desplegar una mayor potencia para mantener la velocidad durante el trayecto.

A continuación, se muestran unos esquemas que permitirán comprender mejor el proceso. Como podemos ver en la Figura 1, para el cálculo se han considerado las aceleraciones y frenados uniformes, a potencia constante.

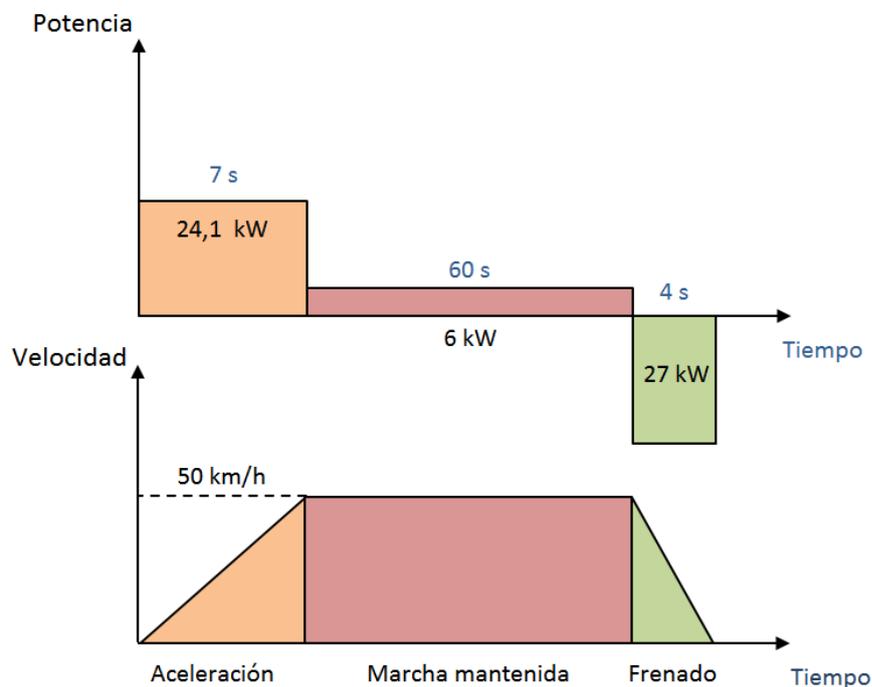


Figura 1. Aceleración, marcha y frenado de la estimación realizada

En definitiva, el frenado regenerativo permite recuperar al menos un 20% de la energía (dependiendo de la situación), lo cual no puede despreciarse.

El frenado regenerativo no sólo permite recuperar parte de la energía, con el consiguiente ahorro económico, sino que también permitirá aumentar la autonomía, reforzando uno de los principales puntos débiles de los vehículos eléctricos.

Por todo esto, la implementación de un sistema AES que sea eficiente en la recuperación de energía del frenado tiene una gran importancia.



3. ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE LA SOLUCIÓN

3.1. Introducción

Como hemos visto en apartados anteriores (Ecuaciones 1.6 y 1.12) las baterías de los vehículos eléctricos necesitan soportar grandes corrientes durante los procesos de aceleración y frenado regenerativo. Los resultados concretos de nuestra estimación eran los siguientes:

$$I_{Aceleración} = 225 A \quad I_{Frenado} = -150 A \quad (3)$$

Para realizar el frenado podríamos apoyarnos en los frenos convencionales, evitando estos esfuerzos eléctricos y disipando la energía sobrante en forma de calor. Sin embargo, estaríamos perdiendo la oportunidad de recuperar parte de la energía y extender un poco más nuestra autonomía, la cual es vital para los vehículos eléctricos. (Se ha calculado un 20,43 % de regeneración de energía, según la Ecuación 2.2).

A continuación, vamos a comparar la corriente calculada en nuestras estimaciones con los valores de una batería de un automóvil actual. Para ello, acudimos a las curvas de características que nos proporciona un fabricante, representadas en la Figura 2.

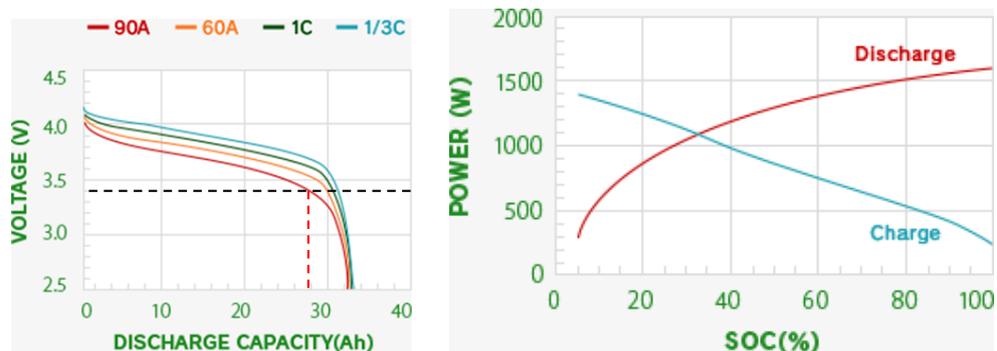


Figura 2. Curvas de carga y descarga de una batería comercial para vehículo híbrido

Como podemos ver en la Figura 2, las corrientes de 60 A y 90 A son superiores a la nominal (la curva de 1C corresponde a unos 30 A) y disminuyen la capacidad (Ah) de esta. Si para proteger las células de una profundidad de descarga (DOD) excesiva interrumpimos el circuito cuando el voltaje baja de un determinado valor (ej.: el valor indicado de 3,4V), podemos ver como los Ah obtenidos para las diferentes corrientes difieren más significativamente.



Si a 90 A las células de la batería ya se ven moderadamente afectadas, podemos suponer que para corrientes como las estimadas, visibles en la Ecuación 3 y superiores a 200 A en la aceleración, estos efectos negativos serán mucho mayores.

Como ya hemos visto en el anexo N° 2, *Problemática en las baterías de ión-litio*, las altas corrientes de carga y descarga provocan numerosos problemas (aumento de temperatura, gasificación, disminución del electrolito, corrosión de terminales), afectando a su rendimiento, auto descarga, capacidad y longevidad. Además, si la batería se encuentra casi por completo cargada y se le exige un frenado regenerativo, la formación del litio metálico puede llevar a producir problemas de inflamabilidad y explosión.

○ **Conclusión del estudio de la problemática**

Para realizar los frenados regenerativos y las aceleraciones, las corrientes que se están exigiendo actualmente a las baterías (más de 200 A) están afectando a sus prestaciones y vida útil. Las baterías de litio son una tecnología cara, por lo que deberemos implantar una solución para aumentar su duración.

3.2. Solución a establecer. Objetivos a cumplir.

Conociendo todo lo anterior, nuestro objetivo será la búsqueda y desarrollo de un Sistema Auxiliar (AES), que asuma estas aceleraciones y frenados exigentes. De esta forma conseguiremos:

- Alargar la vida útil de las baterías, evitando tener que cambiarlas y realizar un desembolso mayor.
- Mejorar el rendimiento durante las aceleraciones y frenados regenerativos, aumentando la potencia que es capaz de desarrollar y regenerar.
- Aumentar la autonomía inicial y a largo plazo, debido al mayor rendimiento y a que se mantiene las baterías en mejor estado. La mejora del rendimiento también se verá reflejada en la factura eléctrica.



3.3. Posibles soluciones

3.3.1 Posibles soluciones al Sistema MES

A continuación vamos a estudiar aquellas tecnologías alternativas al litio como sistema principal de almacenamiento de energía. Las características básicas de un sistema MES ya han sido explicadas en anexo N°1, *Introducción a los vehículos híbridos y eléctricos*.

➤ **Baterías ZEBRA**

Algunas investigaciones están apuntando hacia las baterías que usan sales fundidas como electrolito. Pese a su baja potencia tendrían una alta densidad energética (ver Tabla 2) y una buena tensión por celda. Los materiales que utilizan como electrolito son el sodio-cloruro de aluminio (NaAlCl_4) o el sodio-cloruro de níquel (NaNiCl).

Su mayor problema radica en que algunas de ellas requieren funcionar a una temperatura mayor a 600°C (punto de fusión para mantener en estado líquido al electrolito) con los consiguientes problemas de seguridad e inflamabilidad. Algunos de los nuevos modelos están mejorando este aspecto, necesitando temperaturas inferiores a 300°C .

De todas formas, cuando el vehículo se encuentra detenido el electrolito se enfría, solidificándose y tardando un gran tiempo en estar apto para su utilización. Tal vez sí podrían llegar a utilizarse en vehículos que funcionan durante mucho tiempo, como camiones y autobuses eléctricos.

➤ **Baterías de Zinc-Aire**

Empleando el oxígeno del aire como cátodo, estas baterías podrían proporcionar mayor densidad energética que todas las anteriores y a un bajo precio (el zinc es el electrodo negativo más barato), alcanzando así autonomías mucho mayores. Se encuentran aún en investigación, mejorando su bajo número de ciclos de carga y descarga.

Los valores de densidad energética y energía específica de los diferentes tipos de baterías frente al combustible convencional pueden compararse en la Tabla 2.



Tabla 2. Densidad energética y energía específica de las diferentes tecnologías

	Gasolina 97 octanos	Baterías				
		Plomo-ácido	NiMH	Li-ion	ZEBRA	Zn/Air
Densidad Energética (Wh/l)	9662	60-90	130-170	140-200	186	269
Energía Específica (Wh/kg)	12146	30-45	60-70	90-130	118	230

➤ Pilas de combustible

Las pilas de combustibles también se basan en procesos químicos, pero funcionan de forma diferente de las baterías. En la pila de combustible se deben reabastecer de forma periódica los reactivos consumidos.

Utilizan hidrógeno en lado del ánodo y oxígeno en el lado del cátodo, ambos elementos muy abundantes y obtenibles mediante la electrólisis del agua (lo que conlleva un gasto eléctrico). Las reacciones que se producen son las siguientes:

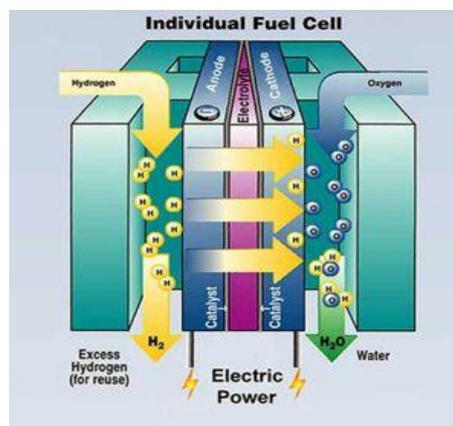
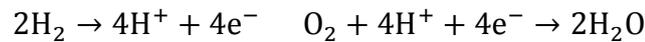


Figura 3. Pila de hidrógeno

Pueden proporcionar autonomías superiores a 200km y se pueden recargar rápidamente. Si se necesitase almacenar el H_2 aparecen varios inconvenientes, ya que es explosivo. Algunas posibilidades son su almacenamiento criogénico, almacenamiento a elevada presión, o en hidruros metálicos.



3.3.2 Posibles soluciones al Sistema AES

El AES deberá ser un dispositivo con una densidad energética media, siendo a su vez capaz de proporcionar altas potencias, consiguiendo los objetivos que nos habíamos propuesto.

Las características más importantes de un sistema AES también han sido explicadas en el anexo N°1, *Introducción a los vehículos híbridos y eléctricos*.

➤ Baterías avanzadas

Una solución al problema estaría en el desarrollo de baterías de mejores prestaciones, con altas potencias y capaces de soportar esas corrientes. Una posibilidad en este sentido serían las llamadas baterías nanoscoops (ver Figura 4).

Aún en investigación, se tratarían de una nueva generación de baterías de litio recargables de alta potencia, permitiendo elevadas corrientes de carga y descarga sin que esto las deteriorase rápidamente, como sucede con las actuales. Esto también permitiría cargarlas hasta 40 veces más rápido, disminuyendo considerablemente el problema del tiempo de carga y la autonomía.

Sus propiedades dependen de la estructura, tamaño y material (C, Al y Si) del nanoscoop. Debido a su estructura y tamaño nanométrico, son capaces absorber y liberar los iones de litio a tasas mucho mayores que los ánodos a escala macroscópica.

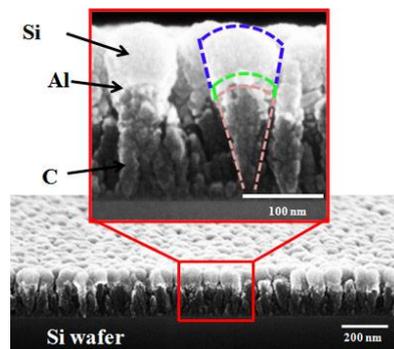


Figura 4. Morfología de las baterías de nanoscoops

Con esta tecnología podríamos obtener un dispositivo que combine alta densidad energética con una alta densidad de potencia, uniendo los sistemas MES y AES en un solo elemento.



➤ Volante de Inercia

El volante de inercia es un elemento mecánico en forma de disco, cuyo funcionamiento consiste en el almacenamiento de energía cinética en su masa, que gira en un eje.

Pueden ser de diferentes materiales: acero, kevlar o fibras de carbono, que proporcionan mayores prestaciones, pero a un mayor coste. Aunque los volantes de carbono pesen menos, pueden girar mucho más rápido (hasta 100.000 rpm), almacenando mucha más energía.

El motor eléctrico está acoplado al eje y proporciona energía al volante aumentando su velocidad. En el proceso de recuperación de energía se hace funcionar al motor como generador y el volante devuelve energía reduciendo su velocidad.

En el diagrama de Ragone de la Figura 5 pueden compararse diferentes dispositivos de almacenamiento de energía. Los volantes de inercia almacenan menos energía que las baterías, pero proporcionan mayor potencia. De esta forma un volante de inercia suaviza el flujo de energía, disminuyendo los esfuerzos y pudiendo aumentar la vida útil de baterías y motores.

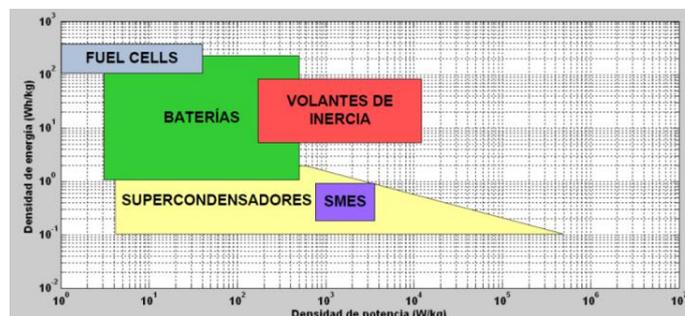


Figura 5. Diagrama de Ragone. Comparación de diferentes dispositivos de almacenamiento de energía

Las ventajas más importantes del volante de inercia son las siguientes:

- Su capacidad apenas se degrada con los ciclos de carga y descarga.
- Su estado de carga se puede medir fácilmente a través de la velocidad de rotación.
- Es una tecnología escalable y de localización universal, que no emplea materiales contaminantes.
- No requiere mantenimiento.



Para reducir las pérdidas por rozamiento los volantes de inercia pueden utilizar rodamientos magnéticos. También se encapsulan al vacío (para evitar la fricción con el aire).

➤ Sistema SMES

El sistema SMES (Superconducting Magnetic Energy System) utiliza una bobina para el almacenamiento de energía en forma de campo magnético. Esto se realiza mediante la circulación de una corriente continua en un anillo fabricado de un material superconductor.

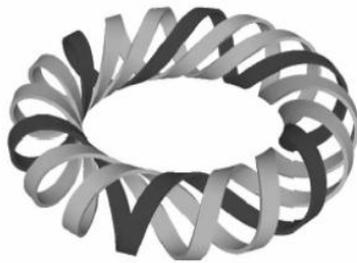


Figura 6. Representación esquemática e imagen real de una bobina para sistema SMES

Emplea un material superconductor que apenas ofrece resistencia, por lo que apenas hay pérdidas por calor. De esta forma la bobina puede absorber una densidad de corriente hasta 100 veces mayor a la de un sistema convencional. Esta característica de estos nuevos materiales permitiría también reducir el peso de las instalaciones.

El sistema SMES consta de 3 componentes principales:

- Una bobina superconductora, para almacenar la energía durante el modo de espera.
- Un sistema de electrónica de potencia, para extraer y proporcionar la energía mediante un conmutador cuando sea necesario. Las pérdidas de este sistema son bajas (del orden del 2-3 %)
- Un sistema de refrigeración criogénico. Por ejemplo, helio líquido.

Es en este último sistema donde se encuentra el principal problema, además del coste total del SMES, ya que para que los diferentes materiales presenten este comportamiento superconductor hay que hacerlos trabajar a una temperatura baja, actualmente por debajo de los -163°C , en los mejores casos. Un esquema explicativo del sistema MES verse en la Figura 7.

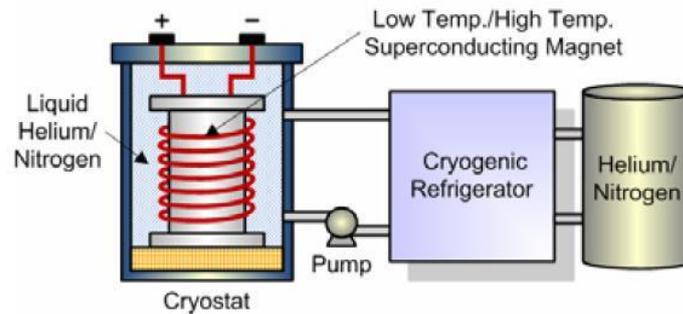


Figura 7. Partes fundamentales de un sistema SMES

➤ Supercondensadores

Los supercondensadores son elementos que, al igual que los condensadores convencionales, almacenan la energía en forma de campo eléctrico. Al no basarse en procesos químicos no presentan los inconvenientes más importantes de los que disponen las baterías. Sus principales ventajas son:

- Larga vida útil, sin pérdida de capacidad.
- Soportan corrientes mayores.
- Alta eficiencia.

Más información sobre los supercondensadores (composición, características, aplicaciones, etc.) se encuentra disponible en el estudio correspondiente (anexo N° 4, *Supercondensadores*).

3.4. CONCLUSIONES

3.4.1 Solución elegida para el sistema MES

Hemos estudiado otras tecnologías (ZEBRA, Zinc-Aire, pila de hidrógeno) frente a las baterías de ion-litio. Sin embargo, también presentan sus propios problemas y muchas se encuentran todavía en investigación.

Otra posibilidad sería utilizar tecnologías ya más afianzadas, como las baterías de Níquel Metal e Hidruro (NiMH), que se emplean en algunos vehículos híbridos. Sin embargo, el principal problema de los vehículos eléctricos está en su autonomía. Si se quiere ofrecer a los consumidores un buen dato de autonomía (superior a los 100



km o incluso a los 200 km), no hay otro remedio que acudir al litio, pese al precio más asequible de otras tecnologías inferiores.

Por lo tanto, el sistema MES consistirá en un paquete de baterías de litio, ya que es la tecnología capaz de almacenar mayor cantidad de energía, como puede apreciarse en la parte superior de la Figura 8.

De todas formas, pese a las diferentes densidades energéticas, todas estas tecnologías de baterías (Li-ión, NiMH, Pb) presentan el mismo problema: no pueden proporcionar altas potencias. Por lo tanto, necesitan de un dispositivo AES que las complemente.

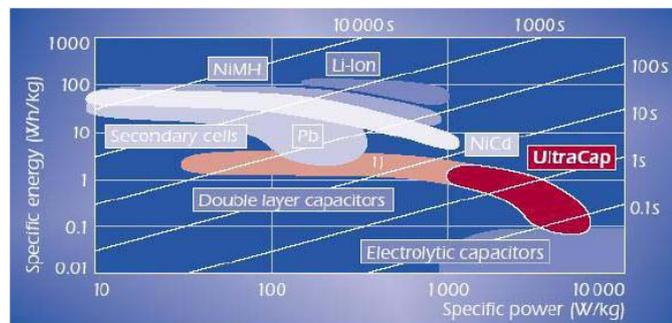


Figura 8. Comparación de dispositivos de almacenamiento energético

3.4.2 Solución elegida para el sistema AES

En cuanto al sistema auxiliar AES, las baterías avanzadas, aunque se tratan de una buena alternativa, aún se encuentran en investigación. Esta tecnología aún tardará un tiempo en desarrollarse y abaratar costes. El volante de inercia presenta buenas características, sin embargo se trata de un elemento mecánico, con sus correspondientes limitaciones. El sistema SMES necesita de temperaturas muy bajas para su funcionamiento, difíciles de mantener en un vehículo, tanto en marcha como estacionado al aire libre.

Finalmente, por tratarse de un sistema eléctrico, presentar una alta eficiencia y tener la capacidad para proporcionarnos los objetivos propuestos hemos seleccionado al supercondensador como Sistema Auxiliar de Potencia (AES).

Aunque su precio pueda ser alto, las ventajas que pueden proporcionarnos los supercondensadores pueden compensar sus costes. Además, cómo se explica en el anexo N°4 *Supercondensadores*, cabría esperar que esta tecnología se abaratase en los próximos años.

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ANEXO N°4

ESTUDIO PREVIO:

SUPERCONDENSADORES

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. SUPERCONDENSADORES. DIFERENCIAS FRENTE A OTRAS TECNOLOGÍAS	2
3. TIPO DE MONTAJE. PROBLEMÁTICA ASOCIADA	4
3.1. Desequilibrio entre las células	6
4. COMPOSICIÓN. ELECTRODOS, ELECTROLITOS Y ADSORCIÓN	6
5. ESTUDIO MATEMÁTICO. ENERGÍA Y CAPACIDAD DE UN SUPERCONDENSADOR	8
5.1. Resultados del estudio matemático	9
6. CONDICIONES DE USO Y VIDA ÚTIL.....	10
7. SUPERCONDENSADORES. VENTAJAS E INCONVENIENTES	12
8. APLICACIONES DE LOS SUPERCONDENSADORES.....	13
8.1. Supercondensador en vehículos eléctricos e híbridos.....	15
9. DATOS DE FABRICANTES. PRESTACIONES Y PRECIOS ACTUALES.....	16
10. FUTURO DE LOS SUPERCONDENSADORES.....	20
11. CONCLUSIONES	21



1. INTRODUCCIÓN

Los condensadores son unos componentes electrónicos pasivos que almacenan energía en forma de campo eléctrico. Están formados por un par de superficies conductoras en forma de láminas o placas que pueden estar separadas por un material dieléctrico o por el vacío.

Es decir que, a diferencia de las baterías, no se basan en procesos químicos, por lo que no dependen de la velocidad de las reacciones químicas. Este hecho va a permitir a los supercondensadores un alto número de grandes tasas de carga y descarga, con una vida útil muy superior a la de las baterías.

El primer supercondensador se patentó en 1959 y comenzaron a ofrecerse comercialmente en la década de los 70. Sin embargo, han sido en estos últimos años, debido a las crecientes necesidades de almacenamiento de energía y potencia en espacios cada vez más reducidos, cuando su demanda comienza a tener un aumento considerable.

2. SUPERCONDENSADORES. DIFERENCIAS FRENTE A OTRAS TECNOLOGÍAS

En los supercondensadores, al igual que en los condensadores convencionales, la energía se almacena de forma electrostática entre dos electrodos, positivo (1) y negativo (2), según la Figura 1. Los supercondensadores también utilizan un separador de un material dieléctrico (3), presentando una doble capa que divide al electrolito. La diferencia fundamental del supercondensador se encuentra en el material utilizado para la fabricación de sus electrodos, así como otros aspectos estructurales que explicaremos en el apartado 4.

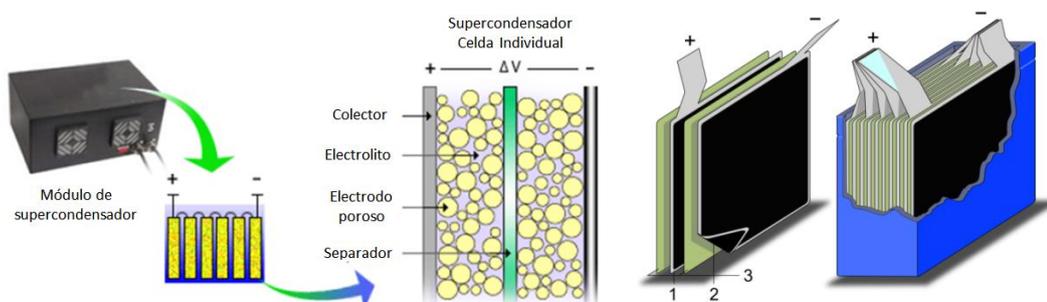


Figura 1. Morfología interna de un supercondensador



Otras características que diferencian a los supercondensadores son:

- Alta Capacidad

Los condensadores convencionales podían dividirse fundamentalmente en polarizados y no polarizados. Los no polarizados presentan unos valores de capacidad típicos del orden de pF. Los polarizados alcanzan valores de μF (si son de pequeño tamaño), sin embargo se debe mantener su polaridad, lo que les impide funcionar en corriente alterna. Como vemos, los valores de capacidad de los condensadores son bajos.

Sin embargo, como explicaremos y calcularemos más adelante (apartado 5), los supercondensadores pueden llegar a alcanzar valores muy superiores, llegando a miles de faradios.

- Resistencia equivalente en serie (ESR)

Inicialmente, los supercondensadores poseían una resistencia en serie alta. Esto provocaba que los antiguos supercondensadores tuviesen mayores pérdidas que los convencionales. No obstante, los modelos más modernos han conseguido reducir lo suficiente la resistencia interna como para alcanzar eficiencias superiores al 90 %.

Los valores de resistencia interna y otros parámetros de los supercondensadores se encuentran disponibles en las Tablas 2, 3, 4, 5 y 6.

- Media densidad Energética y Alta densidad de Potencia

Los supercondensadores no pueden desarrollar la misma potencia por unidad de masa que los condensadores convencionales. Por otra parte, los supercondensadores pueden almacenar una cantidad de energía mucho mayor (10.000 veces más que los condensadores convencionales), sin llegar a alcanzar los valores de una batería de litio (10 veces menos).

Así pues, los supercondensadores cubren el espacio entre condensadores y baterías, siendo un elemento auxiliar de estas últimas, ya que por el momento carecen de la capacidad de almacenamiento de energía suficiente como para remplazarlas totalmente en la mayoría de aplicaciones.



- Tensión por celda limitada.

Los supercondensadores no superan los 3 V por célula (de echo algunos electrolitos no llegan a 1 V). Sin embargo conectando células en serie se han conseguidos tensiones de hasta 3500 V.

Para finalizar esta comparativa se ha desarrollado la Tabla 1, donde pueden verse las características principales de baterías, supercondensadores y condensadores convencionales.

Tabla 1. Comparación entre baterías de litio, supercondensadores y condensadores

	Batería de Litio	Supercondensador	Condensador Convencional
Tiempo de carga	6-8 horas	0,3-30 s	$10^{-3} - 10^{-6}$ s
Energía	110-160 Wh/kg	1-10 Wh/kg	<1 Wh/kg
Potencia	<1 kW/kg	<10 kW/kg	<100 kW/kg
Eficiencia	70-85%	85-98%	95%
Rango de Temperaturas	Sensibles*	-40 a 65°C	-20 a 65°C

*Máximo rendimiento entre 15-25°C. Peligro de explosión a altas temperaturas

3. TIPO DE MONTAJE. PROBLEMÁTICA ASOCIADA

Como acabamos de ver, la tensión por célula del supercondensador es baja, muy inferior a la de un condensador convencional. Para cumplir su misión de proporcionar altas potencias va a ser necesario alcanzar una tensión alta (300 V sería un buen valor), de tal forma que la corriente requerida sea menor.

Al igual que en otras tecnologías, para aumentar la tensión total se deben conectar varios supercondensadores en serie (Ecuación 1.1), como se ve en la parte izquierda de la Figura 2.

$$V_T = V_1 + V_2 + \dots + V_{n_s} = V_i \cdot n_s \quad (\text{Considerando las células iguales}) \quad (1.1)$$

Este montaje en serie para aumentar la tensión no planteaba grandes problemas en las baterías. Sin embargo, los supercondensadores, de forma semejante a los condensadores convencionales, van a ver disminuida su capacidad total (ver Ecuación 1.2), por lo que según la Ecuación 2.1 (más adelante, en apartado 5), va a reducirse la energía que el sistema es capaz de almacenar.



$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_{n_s}} = \frac{C_i}{n_s} \quad (1.2)$$

Para compensar este hecho se puede recurrir a un montaje mixto, conectando los supercondensadores en paralelo, aumentando la capacidad según la Ecuación 1.3.

$$C_T = C_1 + C_2 + \dots + C_{n_p} = C_i \cdot n_p \quad (1.3)$$

De esta forma los diferentes montajes quedan como se ve en la Figura 2:

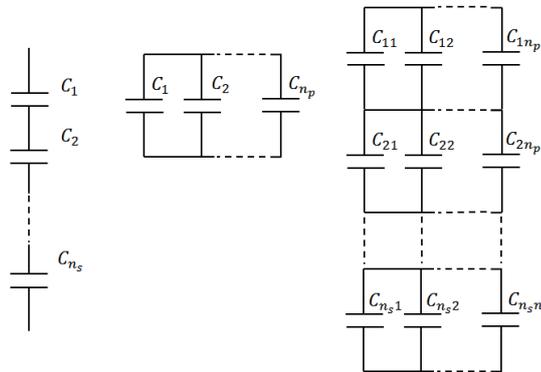


Figura 2. Montaje de supercondensadores en serie, paralelo y montaje mixto

Esto se traduce en que si queremos conseguir una tensión de trabajo aceptable (300V) sin que disminuya demasiado la energía almacenable necesitaremos un gran número de células en serie y en paralelo, por lo que el número final de células será elevado.

Pese a esta problemática, como se puede ver en la posterior Ecuación 2.1, si se conectan muchos condensadores en serie a la vez que disminuye la capacidad aumenta la tensión, por lo que la energía almacenable se mantiene alta. Debido a esto muchas veces es suficiente con el montaje en serie para alcanzar los valores de energía deseados, como se ve en la Figura 3.



Figura 3. Banco de supercondensadores de 132 células de 2,3V en serie. Tensión total de 300V. Desequilibrio entre células corregido mediante resistencias en paralelo



Otros aspectos a tener en cuenta es que el montaje en serie aumenta la resistencia equivalente en serie (ESR), aumentando las pérdidas en forma de calor y disminuyendo el rendimiento. El montaje en paralelo disminuirá la ESR, aunque aumentará la corriente de fugas, corriente que apenas se ve afectada con el montaje en serie.

3.1. Desequilibrio entre las células

En la práctica, las células con las que se realiza el montaje se fabrican con una tolerancia y no pueden llegar a ser exactamente iguales, por lo que existen desequilibrios. Estos desequilibrios producen sobrecargas en las células lo cual conlleva diversos efectos negativos: descomposición del electrolito, generación de gas, aumento de la ESR. Todo esto conduce a una disminución de la vida útil.

El método más sencillo para corregir los desequilibrios consiste en conectar resistencias pasivas en paralelo con las células, aunque existen otras posibilidades como las resistencias conmutadas, diodos zéner o incluso la utilización de convertidores CC/CC, que es el método más costoso. Todos estos métodos pueden verse en la Figura 4.

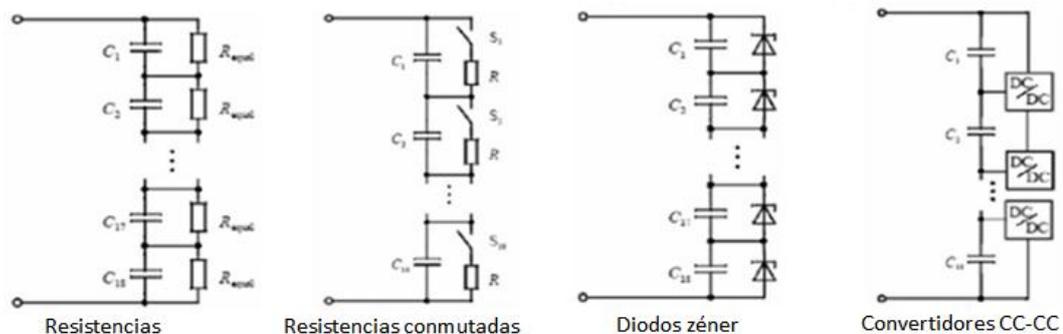


Figura 4. Métodos para la corrección de desequilibrios en las células

4. COMPOSICIÓN. ELECTRODOS, ELECTROLITOS Y ADSORCIÓN

Como ya hemos explicado, un supercondensador se compone de dos electrodos en forma de lámina, con una lámina de un material dieléctrico en medio, separando el electrolito. Los materiales que pueden usarse como electrodos son:



- Óxidos de metales de transición. Aunque proporcionan una elevada capacidad son muy caros, por lo que se emplean solamente en la industria militar y aeroespacial. Ej.: óxido de rutenio (RuO_2) y otros alternativos como NiO_x , CoO_x , MnO_2 , Fe_3O_4 , IrO_2 y V_2O_5 .
- Polímeros conductores. También proporcionan capacidades altas. Sin embargo, sufren grandes contracciones y dilataciones, lo cual disminuye la vida útil.
- Carbono. Se usa carbono activado (altamente poroso) para aumentar el área superficial. Aunque también se está estudiando el uso de nanotubos y aerogeles y xerogeles de carbono.

Son este último tipo de supercondensadores los que están consiguiendo llegar a la comercialización. Asimismo se están buscando diferentes materiales compuestos, para reducir el coste de los óxidos metálicos o mejorar la vida útil de los polímeros.

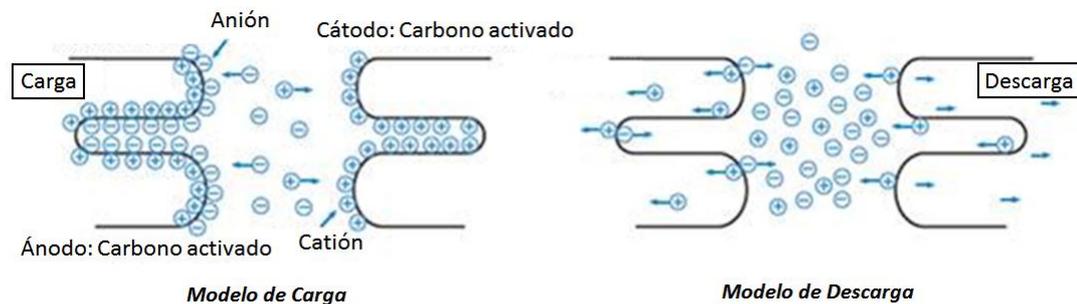


Figura 5. Funcionamiento del carbono altamente poroso

El funcionamiento de los supercondensadores se basa en la **adsorción**, que es un proceso mediante el cual átomos, iones o moléculas son atrapados en la superficie de un material (ver Figura 5). Para que este proceso sea efectivo se utilizan materiales con una elevada área superficial como los descritos.

Para medir el área superficial se emplea nitrógeno gaseoso (N_2). Según el diámetro de los poros podemos encontrar:

Microporos $D < 2 \text{ nm}$

Mesoporos $2 \text{ nm} < D < 50 \text{ nm}$

Macroporos $D > 50 \text{ nm}$

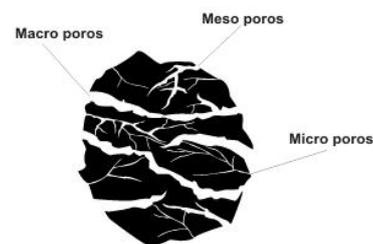


Figura 6. Carbono. Representación esquemática de los poros



Los macroporos son la vía de entrada al carbón activado, los mesoporos realizan el transporte, y los microporos la adsorción.

Recientemente se descubrió que si el tamaño del poro del carbono era pequeño (menor a 1 nm) y coincidía con el tamaño del ion del electrolito que se adsorbe, la energía acumulada aumentaba considerablemente. Sin embargo, si el tamaño del microporo era demasiado pequeño, la densidad energética se resentía. Por lo tanto, el proceso de fabricación óptimo deberá aumentar al máximo la proporción de poros de tamaño idóneo, en función del electrolito.

Por otro lado y como ya habíamos adelantado, los supercondensadores presentan una tensión limitada por célula. Esto depende fundamentalmente de la sustancia que se use como electrolito:

- Electrolitos orgánicos. No solubles. Con valores típicos entre 2,3 y 2,8 V por célula, llegando hasta los 3 V. Ej.: acetronitrilo o carbonato de propileno, ambos con constantes dieléctricas altas.
- Electrolitos metálicos. Normalmente disoluciones de metales alcalinos (NaOH, KOH), que liberan fácilmente iones acumulando una mayor carga eléctrica. Este tipo de supercondensadores almacena mayor energía, pero tiene una tensión por celda inferior (1 V).

5. ESTUDIO MATEMÁTICO. ENERGÍA Y CAPACIDAD DE UN SUPERCONDENSADOR

Vamos a realizar un estudio matemático sencillo para explicar y justificar las características de un supercondensador. La energía almacenada en un rango de tensión de un condensador viene dada por la siguiente expresión:

$$\Delta E = \frac{1}{2} C (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.1)$$

Siendo V_1 y V_2 las tensiones que marcan los valores margen de funcionamiento, pudiendo ser $V_1 = V_{m\acute{a}x}$ y $V_2 = 0$, u otros valores diferentes dependiendo de la aplicación. La energía almacenable también depende de la capacidad C de un condensador, que en este caso se puede calcular de la siguiente forma:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.2)$$



Donde $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$ es la permitividad del vacío, ϵ_r es la permitividad relativa del dieléctrico entre placas y A y d son el área efectiva y distancia entre las placas.

Los materiales dieléctricos se introducen entre las placas de los condensadores para poder disminuir la distancia (d) aumentando la capacidad (C) sin que se produzca la ruptura dieléctrica. Los supercondensadores pueden llegar a tener una distancia final entre capas de carbono de tan solo 10 angstrom (1 nm).

Por otro lado, como ya hemos explicado, los electrodos se construyen de materiales altamente porosos (normalmente carbono activado), con una elevada área superficial (aproximadamente $2500 \text{ m}^2/\text{g}$) y los electrolitos tienen constantes dieléctricas altas (ej.: ϵ_r carbonato de propileno = 64).

Siguiendo la Ecuación 2.2 anterior al aumentar el área A , disminuir la distancia d y utilizar electrolitos con altas constantes dieléctricas ϵ_r conseguiremos aumentar la capacidad C , lo que a su vez, según la Ecuación 2.1, nos lleva a aumentar la energía almacenable en el supercondensador.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 64 \cdot \frac{2500 \text{ m}^2/\text{g}}{10^{-9} \text{m}} \approx 1000 \text{ F/g} \quad (2.3)$$

5.1. Resultados del estudio matemático

Mientras que los condensadores habituales presentan capacidades bajas de pF hasta μF , las características de los supercondensadores (según el resultado de la Ecuación 2.3) les permiten alcanzar capacidades mucho mayores de varios cientos e incluso miles de Faradios, obteniendo asimismo un aumento en la energía que pueden almacenar. La capacidad y energía almacenable final dependerá del tipo de montaje realizado (Figura 2 y Ecuaciones 1.1, 1.2 y 1.3).



6. CONDICIONES DE USO Y VIDA ÚTIL

Además de las altas potencias que desarrollan, las condiciones en las que pueden usarse de los supercondensadores son otras de sus ventajas. Estos elementos pueden operar a mayores rangos de tensión y temperatura que las baterías, con un funcionamiento aceptable a temperaturas relativamente extremas (-40°C a $+65^{\circ}\text{C}$). De hecho los supercondensadores se han llegado a usar en aerogeneradores offshore, por lo que también pueden soportar ambientes marítimos, que son considerablemente agresivos.

Las baterías ven reducida su capacidad de almacenamiento de energía a bajas temperaturas (izquierda de la Figura 7), mientras que la capacidad de almacenamiento de los supercondensadores se mantiene aproximadamente constante (derecha en la Figura 7). Si bien la potencia extraíble sí que se reduce considerablemente, esto no sería un problema demasiado grave, ya que con el sistema en marcha la temperatura aumentaría y recuperaríamos esa característica.

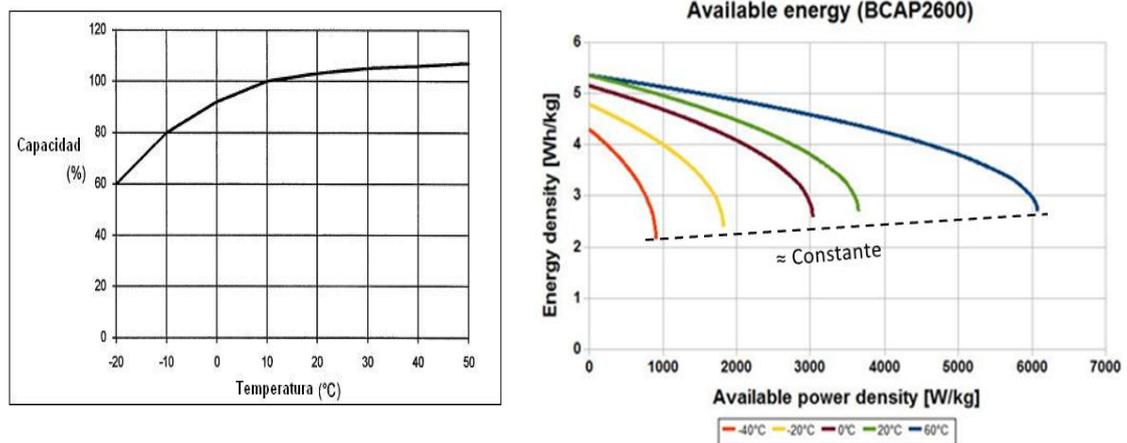


Figura 7. Capacidad energética de baterías (a la izquierda) y supercondensadores (derecha) en función de la temperatura

Las condiciones que afectan negativamente a los supercondensadores son sobretensiones y temperaturas extremas. Las variaciones de temperatura no afectan demasiado a la capacidad de energía almacenable (en azul en la Figura 8) y principalmente aumentan la resistencia equivalente en serie (ESR, en naranja en la Figura 8). Esto disminuye el rendimiento de los supercondensadores a bajas temperaturas, cómo podemos ver en la Figura 9. En comparación con las baterías, estas se ven afectadas de la misma forma a bajas temperaturas, con un aumento de la resistencia interna y una disminución del rendimiento.



Como podemos observar, si trabajamos a unos niveles normales de temperatura (desde -10°C a 40°C) la vida útil y la mayoría de las prestaciones de los supercondensadores no se ven apenas afectadas. Además en ningún caso existen los grandes inconvenientes que tenían las baterías de litio, sensibles a las altas temperaturas, pudiendo llegar incluso a la explosión.

ESR AND CAPACITANCE VS TEMPERATURE

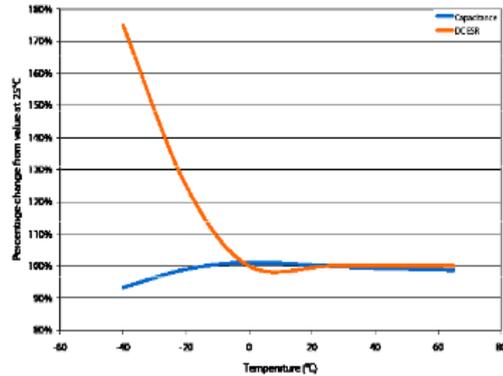


Figura 8. Efectos de la temperatura en los supercondensadores

Efficiency @ 200 W 2600 F

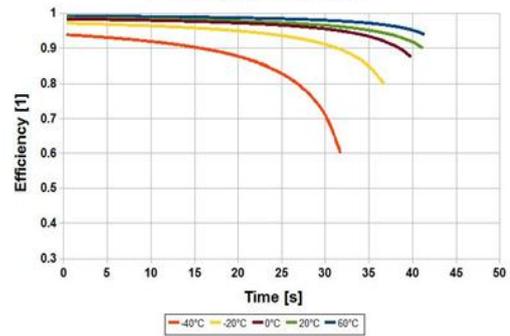


Figura 9. Efectos de la temperatura sobre la eficiencia

En cuanto al ciclo de vida de los supercondensadores, como podemos extraer de la Figura 10, es muy superior al de las baterías. Es bastante común que durante la vida útil de un vehículo eléctrico se tenga que recambiar al menos una vez el paquete de baterías, lo cual supone un coste adicional muy importante (sean baterías de Litio-ión o de NiMH son una tecnología cara).

En cambio, la vida útil del supercondensador puede igualar la del vehículo eléctrico, o incluso superarla. Es decir, aún podrían tener un valor considerable en el desguace, ya que podrían reutilizarse como recambio en otro vehículo u en otra aplicación.

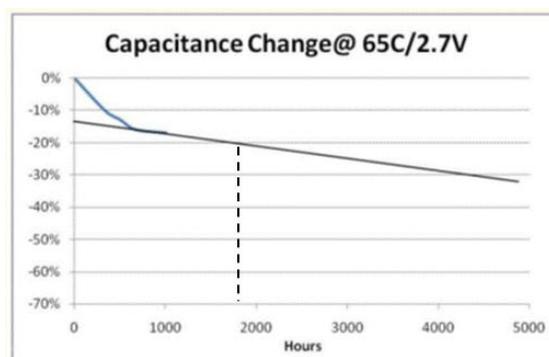


Figura 10. Capacidad de un supercondensador en función del número de ciclos



En la Figura 10 anterior se hace trabajar al supercondensador en continuos ciclos de carga y descarga. Haciendo un cálculo sencillo, los ciclos con los que trabaja el supercondensador durante los frenados y aceleraciones son cortos, de unos 10 segundos. Siguiendo los mismos criterios que los usados para una batería, vamos a considerar que su vida útil ha terminado cuando su capacidad de almacenamiento de energía baja del 80 %, lo que en la Figura 10 anterior suponen unas 2000 horas.

Con estos datos, estimamos la vida útil en ciclos de un supercondensador:

$$\frac{2000 \text{ h} \cdot 3600 \text{ s/h}}{10 \text{ s/ciclo}} = 720.000 \text{ ciclos} \quad (3)$$

Como podemos ver por la Ecuación 3, el número de ciclos de un supercondensador es de varios cientos de miles (valor que coincide con los parámetros que nos dan los fabricantes: 500.000 – 1.000.000 de ciclos). Este es un valor muy superior al de las baterías, las cuáles alcanzan en torno a los 5.000 ciclos, en los mejores casos.

7. SUPERCONDENSADORES. VENTAJAS E INCONVENIENTES

Por sus características actuales, los supercondensadores pueden usarse como apoyo a la batería, pero no reemplazarla. Su principal función es la de proporcionar potencia, ya que no pueden almacenar tanta cantidad de energía como una batería.

Aunque su baja densidad energética bien podría ser una desventaja, en realidad, su principal inconveniente radica en su coste. El precio del kWh del supercondensador es alto (15000 €/kWh), muy superior al de la baterías, o incluso mayor al de otros sistemas auxiliares de potencia, como el volante de inercia. Sin embargo, este inconveniente puede verse compensado por sus grandes ventajas, muchas de las cuales hemos venido explicando anteriormente:

- Altas capacidades (del orden de 3000 F por célula, aunque la capacidad final de los módulos se reduce tras el montaje).
- Alta densidad de potencia (hasta 10 kW/kg) y media densidad de energía (10 kWh/kg), con posibilidad de aumentar estas prestaciones en un futuro.
- Larga vida útil (incluso llegando a millones de ciclos) y sin pérdida de capacidad por efecto memoria, ya que no se basan en reacciones químicas.



- Gran rango de tensión y temperatura de funcionamiento. Las baterías no funcionan de forma correcta en valores demasiado altos o bajos de temperatura.
- Alta eficiencia (superior al 90%). Presentan mayor resistencia interna que los condensadores convencionales, pero los modelos más modernos han conseguido solucionar este problema, con resistencias internas inferiores a las de las baterías.
- Velocidad de respuesta alta, con un tiempo de recarga muy inferior (de minutos o incluso segundos), capaces de soportar altas corrientes de carga-descarga.
- Más ligeros que las baterías. La disminución de peso en los vehículos eléctricos es un factor importante, ya que permite aumentar su autonomía.
- Tensión por celda limitada. Se puede solucionar con el montaje en serie.
- Muy baja autodescarga.
- Valor de carga fácil de monitorizar (midiendo la tensión).
- A diferencia de otros sistemas de almacenamiento de energía, no se componen de elementos tóxicos (cumplen la directiva Europea RoHS).
- No necesitan mantenimiento.

Como otros sistemas AES propuestos, los supercondensadores son capaces de reducir los esfuerzos eléctricos a los que se ven sometidas las baterías, aumentando su rendimiento, vida útil y capacidad a largo plazo, objetivos que nos hemos propuesto.

8. APLICACIONES DE LOS SUPERCONDENSADORES

Los supercondensadores son unos dispositivos únicos, que pueden usarse para múltiples aplicaciones. A continuación describiremos algunas de ellas:



➤ Alumbrado de emergencia

Pese a que los supercondensadores tienen una limitada capacidad energética, combinados con bombillas LEDs (que tienen un consumo bajo) pueden mantener las luces de emergencia encendidas durante horas, lo cual es tiempo más que suficiente.

➤ Máquinas elevadoras

Los supercondensadores pueden usarse para proporcionar las potencias requeridas por ascensores, grúas, montacargas, etc.

Por ejemplo, el supercondensador se puede cargar lentamente cuando el ascensor está en desuso y proporcionar altas potencias cuando se requiera, sin necesidad de exigirselas a la red eléctrica.

➤ Carga rápida

El supercondensador tiene la capacidad de cargarse en minutos o incluso segundos. Esto podría utilizarse para múltiples aplicaciones portátiles: móviles, ordenadores, linternas, utensilios de cocina, taladros...

El supercondensador también es una buena opción para otros sistemas electrónicos como memorias, relojes, cámaras de alta precisión...

➤ Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (UPS o SAI)

Para aquellas aplicaciones en las que la continuidad de servicio es crítica: servidores de internet, bases de datos, telecomunicaciones, hospitales, fábricas, etc.

Muchos otros sistemas de alimentación, como las baterías o generadores diésel, pueden proporcionar energía ante un corte. Sin embargo, no siempre tienen la potencia y la rapidez suficiente como para responder de forma instantánea y fiable ante una interrupción. En cambio, los supercondensadores sí pueden hacerlo, dando tiempo al sistema principal de energía para ponerse en funcionamiento.

➤ Mejora de la calidad de la energía

Los supercondensadores también pueden usarse para absorber las variaciones y picos de tensión y corriente. En este sentido, tendrían una importante aplicación en el campo de las energías renovables, solar y eólica fundamentalmente, que por su naturaleza presentan una gran intermitencia.



Los fenómenos como fuertes variaciones del viento, aparición de nubes, etc., suelen tener una duración inferior a 5 minutos. Gracias a los supercondensadores, la inestabilidad del suministro de energía a la red se reduce considerablemente.

➤ Automóviles eléctricos e híbridos

Esta es la aplicación que nos interesa en este proyecto, así que la describiremos en mayor profundidad.

8.1. Supercondensador en vehículos eléctricos e híbridos

La alta potencia específica, junto a la moderada energía específica de los supercondensadores les hace idóneos para su uso en automóviles híbridos y eléctricos, incluyendo también trenes, autobuses, etc. Gracias a ellos serán posibles grandes aceleraciones y frenados regenerativos con mínimas pérdidas de energía, mejorando la vida útil de las baterías.

Para ello se controla la corriente necesaria para la aceleración y frenado (positiva o negativa). Si se excede un límite (valor de intensidad sin degradación en las baterías) el supercondensador aporta la diferencia.

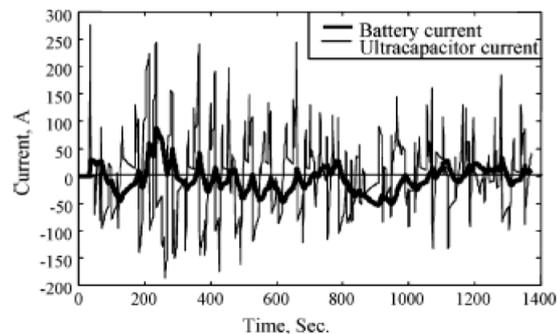


Figura 11. Sistema MES-AES. Corriente aportada por las baterías y supercondensadores

Como vemos en la Ecuación 2.1, la energía almacenada de un supercondensador es proporcional a su capacidad, así como a su tensión al cuadrado. Para controlar la energía almacenada en el supercondensador es necesario medir la tensión y corriente en la batería, la tensión y corriente del supercondensador y también la velocidad del vehículo. Esto se debe a que el estado de carga del condensador estará en función de la velocidad del vehículo. Teniendo en cuenta que la energía cinética es proporcional al cuadrado de la velocidad el funcionamiento será el siguiente:



- A velocidad alta se extrae energía del condensador, preparándolo para recibir energía del frenado.
- A velocidad baja la energía del condensador se reserva y se mantiene en alza, preparándolo para la aceleración.

Otro uso de los supercondensadores en este ámbito puede ser su aplicación para el arranque en frío de vehículos, o para aquellas aplicaciones en las que hay múltiples paradas y arranques (autobuses). De esta forma no se requiere extraer la energía del arranque de las baterías (aumentado su vida útil) o del motor de combustión (que es menos eficiente a bajas revoluciones).

Además, los supercondensadores no solo pueden complementar a la tecnología del litio (o baterías similares), que es la que hemos planteado como sistema principal de energía (MES) para nuestro vehículo eléctrico. También pueden proporcionar apoyo a otras fuentes de energía diferentes, como la célula de hidrógeno o al combustible convencional en vehículos híbridos.

Como ejemplos reales del supercondensador aplicado a automoción tenemos la flota de autobuses de París (aquellos fabricados por la empresa Alemana Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg) y algunos de los KERS empleados en la Fórmula 1.

9. DATOS DE FABRICANTES. PRESTACIONES Y PRECIOS ACTUALES

Para conocer en más detalle las características y parámetros de los supercondensadores actuales hemos visitado la página web de uno de los fabricantes y examinado sus productos.

Hemos visto que disponen de una amplia variedad de supercondensadores, desde aquellos empleados para la electrónica de consumo, pasando por aquellos destinados a su uso como fuentes de alimentación UPS o a las energías renovables, hasta aquellos de nuestro interés, específicamente fabricados para autobuses y automoción en general.

Algunos de estos últimos supercondensadores pueden verse en la Figura 12. Además serán los empleados para el posterior dimensionamiento del banco de supercondensadores de nuestro sistema AES.



Figura 12. Supercondensadores orientados a la automoción

Viendo los datos del fabricante podemos comprobar que sus módulos están contruidos mediante células en serie. Aunque anteriormente mencionábamos que este montaje reduce la capacidad total, se prefiere el montaje serie frente al mixto debido a que es más barato, tiene un menor peso y la energía final no se ve demasiado afectada. Comparamos las células y módulos de la Figura 12 para verificar que corresponden a un montaje en serie:

$$2,7 \text{ (K2 Series)} \cdot 18 \text{ células} \approx 48 \text{ V} \quad (4.1)$$

$$\frac{3000 \text{ F (K2 Series)}}{18 \text{ células}} \approx 165 \text{ F} \quad (4.2)$$

En la siguiente imagen podemos ver otro módulo que se usa para estabilizar la energía extraída de las energías renovables (energía eólica). Aquí sí podemos ver un ejemplo de un montaje mixto de módulos, en serie y paralelo.

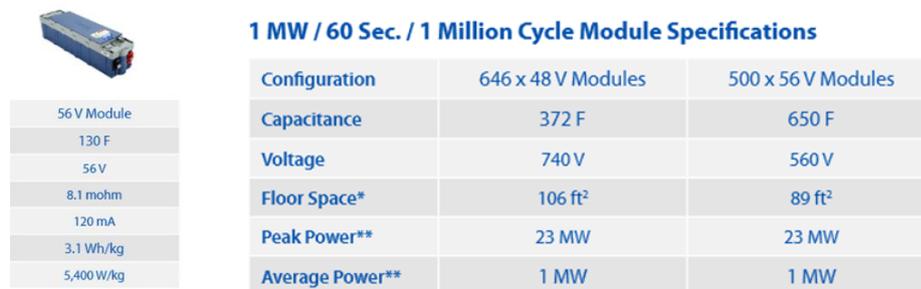


Figura 13. Montajes de supercondensadores orientados a la energía eólica

Podemos comprobar como el segundo montaje de la Figura 13 consta de 10 módulos en serie y 50 en paralelo (10x50=500 módulos).



$$56 \text{ V} \cdot 10 \text{ módulos en serie} = 560 \text{ V} \quad (4.3)$$

$$\frac{130 \text{ F}}{10 \text{ módulos en serie}} \cdot 50 \text{ módulos paralelo} = 650 \text{ F} \quad (4.4)$$

Si consultamos la hoja de características de los anteriores módulos y células podemos ver las temperaturas de funcionamiento mencionadas en el apartado 6, así como otros parámetros significativos. Se han agrupado los datos en forma de tabla, para una mejor lectura. En la tabla 2 puede verse el peso y dimensiones de diferentes asociaciones de supercondensadores.

Tabla 2. Dimensiones y peso de los supercondensadores orientados a vehículos

	Dimensiones (mm)			Peso (kg)
	Longitud	Ancho	Altura	
BCAP3000 - 2,7 V	138	60,4	60,7	0,51
BMOD0165 BXX - 48 V	416,2	190, 1	156,7	13,5
BMOD0063 - 125 V	425	619	265	60,5

En las Tablas 3, 4 y 5 se detallan las características de las diferentes asociaciones de supercondensadores:

Tabla 3. Características más importantes de las células de 3000 F y 2,7 V

K2 Series 2,7 V	BCAP3000
Resistencia térmica	3,2°C/W
I _{CC} máx. (15°C)	130 A
I _{CC} máx. (40°C)	210 A
Energía almacenable	3,04 Wh
Máx. Tensión Serie	//
ESR	0,29 mΩ
Máx. I Pico	2200 A

Tabla 4. Características más importantes de los módulos de 165 F y 48 V

Módulo 48 V	BMOD0165 BXX
Resistencia térmica	0,4°C/W
I _{CC} máx. (15°C)	77 A
I _{CC} máx. (40°C)	130 A
Energía almacenable	53 Wh
Máx. Tensión Serie	750 V
ESR	6,3 mΩ
Máx. I Pico	1900 A



Tabla 5. Características más importantes de los módulos de 63 F y 125 V

Módulo 125 V	BMOD0063 P125
Resistencia térmica	0,04°C/W
I _{CC} máx. (15°C)	140 A
I _{CC} máx. (40°C)	240 A
Energía almacenable	136,7 Wh
Máx. Tensión Serie	1500 V
ESR	18 mΩ
Máx. I Pico	1800 A

Con estos datos confirmamos aspectos de los que ya habíamos hablado, como una menor energía almacenable de los supercondensadores frente a las baterías, su mayor capacidad para proporcionar altas corrientes, su moderado peso y tamaño real...

También hemos considerado importante consultar los precios, para hacernos una idea del coste de esta tecnología y comenzar a prever si puede ser asequible y rentable. Como es habitual, a más unidades compradas, el fabricante nos las vende más barato. Los precios actuales pueden evaluarse en la Tabla 6.

Tabla 6. Precios de los supercondensadores orientados a vehículos

Célula K2 2,7 V	Precio por unidad		
	1 ud.	25 ud.	200 ud.
BCAP3000 F	52,71 €	46,24 €	43,41 €
Módulo 48 V	Compra de 1 unidad		5 ud. o más
BMOD0165 BXX	1.437,40 €		1.380,00 €
Módulo 125 V	1 sola unidad		
BMOD0063 P125	5.548,00 €		

Precisamente, uno de los problemas del vehículo eléctrico es su baja tasa de fabricación. Si se fabricasen vehículos eléctricos en serie en grandes cantidades los costes por unidad se reducirían.



10. FUTURO DE LOS SUPERCONDENSADORES

Dadas sus características actuales, los supercondensadores no pueden usarse por sí solos en un vehículo eléctrico, ya que no pueden almacenar la suficiente energía como para alcanzar autonomías razonables. Es por ello que en este proyecto funcionan como sistema auxiliar AES, proporcionando potencia.

Los supercondensadores ya usan distancias nanométricas entre sus placas. Sin embargo, aún existe margen de mejora. Por ejemplo, a través del desarrollo de matrices verticales de nanotubos de carbono, visibles en la Figura 14, la energía almacenable aumentaría.

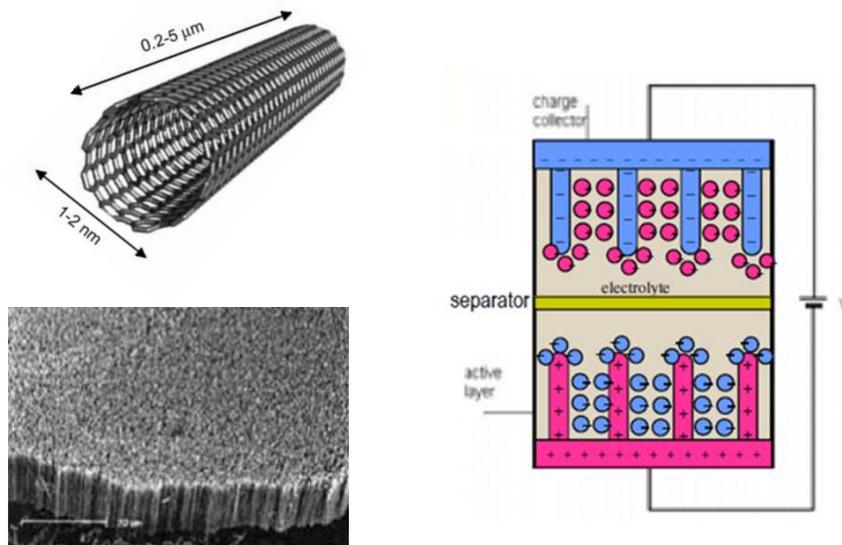


Figura 14. Supercondensadores construidos mediante nanotubos de carbono

De esta forma, las prestaciones de los supercondensadores mejorarían, tal como puede verse en las estimaciones de la Tabla 7.

Tabla 7. Estimación de las prestaciones de los supercondensadores construidos mediante nanotubos de carbono. Comparación.

	Litio-ion	Supercondensadores actuales	Expectativas del MIT
Energía específica (Wh/kg)	140	5,44	30-80
Potencia específica (kW/kg)	0,2	5,61	40
Tensión por celda (V)	2,2	2,7	3,5-4



Si bien los supercondensadores no alcanzarían autonomías tan grandes como las de las baterías (llegarían a alcanzar hasta 150 km frente a los 300 km que alcanzan algunas baterías actualmente), con los cargadores adecuados podrían recargarse por completo en unos 2 minutos, pudiendo reanudar rápidamente la marcha y eliminando uno de los principales inconvenientes del vehículo eléctrico. Además su vida útil sería varias decenas de veces la vida útil del vehículo, como se extrae de las ecuaciones 5.1 y 5.2.

$$100.000 \text{ ciclos} \cdot 150 \text{ km} = 15.000.000 \text{ km} \quad (5.1)$$

$$\frac{15.000.000 \text{ km}}{300.000 \text{ km/vida de vehículo}} = 50 \text{ vidas útiles} \quad (5.2)$$

Si estas predicciones llegaran a cumplirse, la inversión en supercondensadores quedaría totalmente justificada, ya que se convertirían en dispositivos capaces de proporcionar altas potencias y energía suficiente, disponiendo a su vez de una larga vida útil.

De todas formas, en este trabajo se ha realizado un sistema combinando baterías y supercondensadores, utilizando sus características actuales. Si las prestaciones energéticas de los supercondensadores mejorasen, podría empezar a plantearse el desarrollo de un vehículo de pequeña masa (ej.: motocicleta) empleando solo supercondensadores.

11. CONCLUSIONES

Como hemos visto, el supercondensador es una tecnología versátil, capaz de usarse en condiciones extremas, con numerosas ventajas y usos, así como con posibilidades de crecimiento y mejora. Puede usarse en aplicaciones que van desde la pequeña electrónica así como en aplicaciones de potencia, pudiendo servir como elemento auxiliar de potencia a diferentes tecnologías (litio, célula de hidrógeno, etc.).

Dadas sus múltiples ventajas y aplicaciones, podemos augurar una buena perspectiva de futuro para estos dispositivos, así como pronosticar una bajada en los costes de fabricación y adquisición según se vaya desarrollando su tecnología y aumentando su demanda en sus diferentes ámbitos de aplicación.

Por todo lo anterior, el supercondensador fue la solución elegida para resolver la problemática de las baterías y alcanzar el resto de objetivos del proyecto.

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ANEXO N°5

ESTUDIO PREVIO:

ESTUDIO DE IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.	COMPARATIVA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO Y DE COMBUSTIÓN.....	2
3.	CONTAMINANTES EMITIDOS POR EL VEHÍCULO CONVENCIONAL.....	6
3.1.	Emisiones de CO ₂	6
3.2.	Emisiones de óxidos de nitrógeno y azufre	7
3.3.	El ruido	9
4.	CONTAMINANTES DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO. BATERÍAS.....	10
4.1.	Directiva RoHS y otras normativas.....	10
4.2.	Reciclado de las baterías de litio. Futuro a largo plazo de esta tecnología	11
5.	IMPACTO SOBRE LA RED ELÉCTRICA.....	14
6.	CONCIENCIA MEDIOAMBIENTAL. EL VEHÍCULO ELÉCTRICO.....	16
7.	CONCLUSIONES.....	18



1. INTRODUCCIÓN

Dada la temática de este trabajo, se ha considerado necesario realizar un breve estudio del impacto medioambiental del proyecto, aspecto que cada vez se toma en más importancia y consideración.

No estaríamos hablando del vehículo eléctrico si los vehículos convencionales no planteasen problemas medioambientales y energéticos. A continuación trataremos ambos aspectos, que son también dos motivos que justifican este proyecto.

2. COMPARATIVA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO Y DE COMBUSTIÓN

Para empezar, el vehículo de combustión utiliza combustible fósil (gasolina, diésel y en menor medida gas natural), el cual nos genera una fuerte dependencia de los países productores de petróleo, recurso que tarde o temprano acabará por agotarse.

Aunque los diversos estudios arrojan resultados variables, muchos consideran que el pico de producción de petróleo se alcanzará en 2020/30. A partir de entonces aún quedará petróleo para algunas décadas. Sin embargo, con su producción en caída, difícilmente podrá afrontarse una demanda que continúa aumentando año tras año.

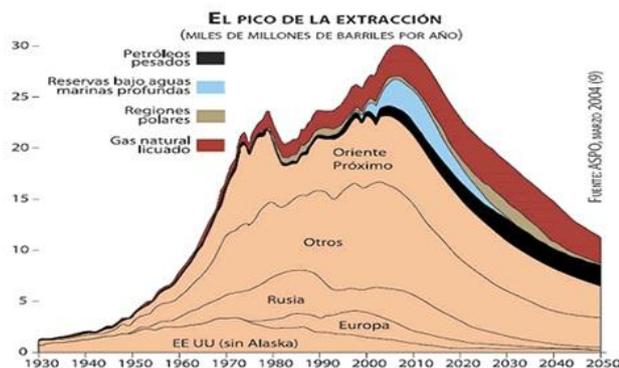


Figura 1. Producción mundial de petróleo, según la ASPO (Asociación para el Estudio del Cenit del Petróleo)

Otra parte del problema consiste en que el precio de estos combustibles aumenta considerablemente cada año. Por este motivo, aquellos países que no son productores (como el nuestro) deben buscar alternativas energéticas, como la energía nuclear o las energías renovables.



La problemática energética es también causa de conflictos internacionales. Además, el transporte del petróleo por mar puede provocar desastres ecológicos. Por ejemplo, el del petrolero Prestige, que se hundió con una carga de 77.000 toneladas a 250 km de la Costa da Morte. Otros derrames de crudo pueden verse en la Tabla 1:

Tabla 1. Mayores derrames de crudo de la historia

Derrame	Ubicación	Fecha	Derrame (t)
Derrames Guerra del Golfo	Golfo Pérsico	Enero 1991	1,360k-113,293k
Pozo Ixtoc I	Golfo de Méjico	1979 - 1980	480k
Atlantic Empress / Aegean	Trinidad y Tobago	Julio 1979	287k
Valle de Fergana	Uzbekistan	Marzo 1992	285k
Campo de petróleo Nowruz	Golfo Pérsico	Febrero 1983	260k
ABT Summer	Frente a Angola	1991	260k
Castillo de Bellver	South Africa	Agosto 1983	252k
Amoco Cadiz	Brittany, Francia	Marzo 1978	223k
Amoco Haven	Próximo a Genoa, Italy	1991	144k
Odyssey	Nueva Escocia, Canada	1988	132k
Sea Star	Golfo de Oman	Diciembre 1972	115k
Torrey Canyon	Scilly Isles, UK	Marzo 1967	100k
Irenes Serenade	Navarino Bay, Grecia	1980	100k
Urquiola	A Coruña, España	Mayo 1976	100k

En España, el sector del transporte consume un 38 % de la energía nacional y es el responsable del 29 % de las emisiones de CO₂, según datos del BOE de 2013, y contribuye a que nuestra dependencia energética exterior sea próxima al 80 %, muy superior a la media europea.

Por este motivo, el gobierno ha concedido hasta 10 millones de euros en incentivos para el impulso del vehículo eléctrico, los cuáles según sus cálculos favorecerán a la adquisición de cerca de 5.000 vehículos eléctricos. Se prevé que esto reducirá, a lo largo de la vida útil de los vehículos, la emisión de un total de 75.000 toneladas de CO₂ y el ahorro de 150.000 barriles de petróleo, cuyo precio se mantiene en alza. Originalmente la cuantía de estos incentivos era de 49 millones, pero ha sido reducida a 10 millones debido a las actuales dificultades económicas.

Por otro lado, el vehículo convencional utiliza el combustible de forma poco eficiente y generando una gran cantidad de subproductos (CO₂, NO_x, SO_x, hidrocarburos), que causan problemas tanto a corto como a largo plazo. Los contaminantes emitidos por los vehículos serán estudiados en el siguiente apartado.

En cambio, el vehículo eléctrico no emite gases localmente. Además, es mucho más eficiente y sus emisiones globales son también menores, lo que se demostrará a continuación.



Algunos detractores del vehículo eléctrico advierten de que la energía con la que se recargan, procedente de la red, proviene de fuentes no renovables (ej.: centrales de carbón), y que son igualmente contaminantes.

Para poder saber cuánto hay de cierto en esa afirmación, hay que tener en cuenta numerosos aspectos como los rendimientos de la generación de electricidad, pérdidas en la red de distribución, así como el rendimiento del cargador de la batería, la propia batería, convertidores CC/CC del vehículo, motor eléctrico y sistema de transmisión.

Para el caso de España hemos encontrado los siguientes datos al respecto:

Tabla 2. Datos de kWh necesarios desde el vehículo hasta el lugar de producción de energía

$kWh_{E_{mec}}/100km$	$kWh_b/100km$	$kWh_c/100km$
Son los kWh que cada 100km se transforman en <i>energía mecánica</i> aprovechable, a partir de los 13,78 kWh de la batería	Son los kWh que cada 100km se consumen de la batería	Son los kWh que cada 100km es necesario extraer del <i>enchufe</i> de carga para proporcionar los 13,78 kWh a la batería. Son los kWh que pagamos cada 100km
9,73	13,78	14,38

$kWh_g/100km$	$kWh_m/100km$
Son los kWh que cada 100km se han producido en la <i>central</i> para proporcionar los 13,78 kWh a la batería. Son los kWh empleados para los cálculos de contaminación de $kgCO_2/kWh$ de las centrales	Son los kWh que cada 100km es necesario extraer del <i>medio</i> para proporcionar los 13,78 kWh a la batería
15,35	31,66

Como podemos observar son 9,73 kWh útiles los que mueven el vehículo y 13,78 kWh son los consumidos por la batería (debido al rendimiento del vehículo). En la factura eléctrica tendríamos que pagar 14,38 kWh (debido a las pérdidas durante la recarga). Dadas las pérdidas en la distribución de energía eléctrica, en la central es necesario producir 15,35 kWh. Por último, dado los rendimientos medios en la producción de energía, es necesario extraer del medio hasta 31,66 kWh.

Sin embargo, por mucho que haya aumentado el coste energético final, los coches eléctricos siguen siendo mucho más eficientes que los de combustión interna. Un vehículo diésel puede llegar a consumir menos de 5 litros por cada 100 km, lo que suponen unos 50 kWh, claramente superiores a los necesarios por el vehículo eléctrico.

Además, para los vehículos de combustión también existen pérdidas adicionales en el transporte y distribución del combustible. En la Figura 2 se resumen el valor de las diferentes pérdidas y la eficiencia final.

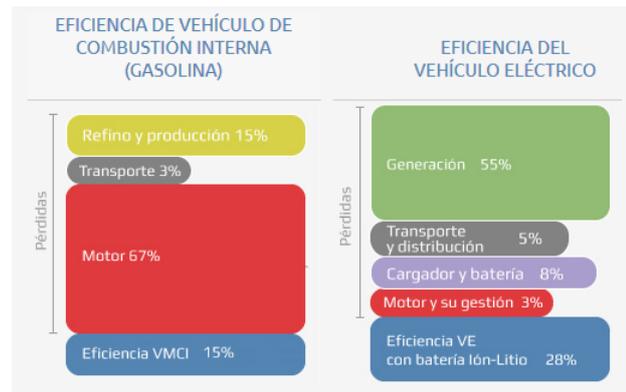


Figura 2. Comparación de la eficiencia energética del vehículo eléctrico y vehículo de combustión interna. Fuente: IDAE

Como vemos en la Figura 2, el rendimiento final de la cadena energética del vehículo eléctrico es del 28 %, mientras que los de combustión se sitúan en torno a un 15%. Así pues, el proceso del vehículo eléctrico es más eficiente, por lo que también emiten menos CO₂ de forma global.

Este hecho se vería aún más reforzado según aumente la proporción de energías renovables (solar, eólica, biomasa) en la energía de la red. La estimación del mix eléctrico español para 2020 puede verse en la Figura 3, donde podemos observar que las renovables aumentarían del 25 % al 42 %.

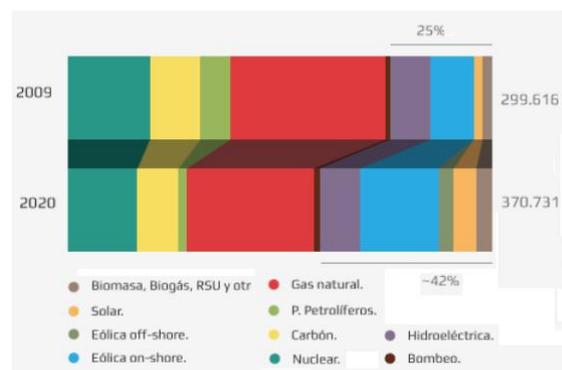


Figura 3. Producción bruta en GWh (2009/2020). Fuente: Estimación del MITyC

Por otro lado, algunos rechazan al vehículo eléctrico por ser un intento de mantener el modelo de transporte privado actual, que tachan de insostenible y que debe ser modificado, buscando el consumo local y el transporte público. La aparente limpieza del vehículo eléctrico, cuyas emisiones se producen en los centros de producción de energía, podría incentivar el transporte privado, aumentando el número de vehículos totales.



Este aumento del número de automóviles también podría producirse debido a las diferentes características entre los dos vehículos. En el hipotético caso de que los consumidores pudiesen permitirse ambos vehículos, si el eléctrico comienza a ser utilizado en ciudad, mientras que el vehículo de combustión se mantiene para trayectos largos (sin llegar a ser sustituido), el número de vehículos totales podría duplicarse.

3. CONTAMINANTES EMITIDOS POR EL VEHÍCULO CONVENCIONAL

Como se ha concluido del estudio anterior, el vehículo de combustión produce mayores emisiones de CO₂ globales, así como la emisión de otros componentes: NO_x, SO₂, hidrocarburos volátiles y nanopartículas cuyos efectos todavía no se han estudiado en profundidad. El porcentaje de estas emisiones debido al transporte puede verse en la Figura 4.

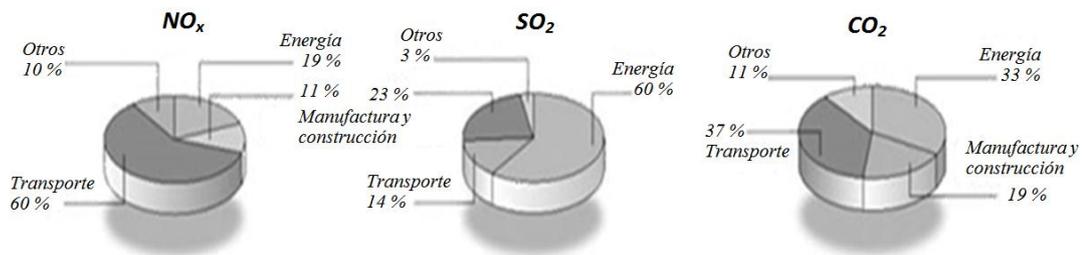


Figura 4. Procedencia de los diferentes contaminantes.
Fuente: UNFCCC. Datos referidos a España en 2000

3.1. Emisiones de CO₂

Pese a políticas como el protocolo de Kyoto, las emisiones de CO₂ siguen aumentando cada año. En 2005 se emitieron a la atmósfera un total de 26.400 Gt. La concentración de CO₂ en la atmósfera es de 387 ppm (0,0387 %) y aumenta a una razón de aproximadamente 2 ppm anuales.

El CO₂ es el principal responsable del efecto invernadero. Este efecto consiste básicamente en que los rayos solares de onda corta atraviesan la atmósfera calentando la Tierra, que emite radiación en forma de onda larga, la cual sí es reflejada por la atmósfera, impidiendo el escape de la energía.



El denominado efecto invernadero es un proceso necesario, ya que garantiza las temperaturas templadas del planeta. Sin embargo, el excesivo aumento de la concentración de CO_2 provocado por el hombre puede llevar a un aumento de la temperatura del planeta, lo cual podría causar graves consecuencias. De hecho, algunos expertos atribuyen ya algunas de las catástrofes naturales ocurridas en los últimos años a los efectos del calentamiento global.

Por otro lado, el CO_2 también resulta directamente perjudicial para las personas. Es menos peligroso que el monóxido de carbono (CO , también emitido por vehículos), pero causa asfixia a partir de cierto umbral (en 10 minutos con una concentración del 10 %). De igual forma, puede provocar problemas respiratorios en concentraciones bajas (mayores al 0,1 %), sobre todo en grupos de riesgo.

Otro hecho perjudicial menos conocido es que el aporte masivo de CO_2 en los océanos provoca una disminución del pH del agua, haciéndola más ácida y disminuyendo la concentración de carbonatos, afectando al ecosistema marino.

3.2. Emisiones de óxidos de nitrógeno y azufre

El NO y el NO_2 son los óxidos de nitrógeno más presentes en la atmósfera y han sido introducidos principalmente por el hombre. La principal fuente de estos contaminantes son los vehículos de combustión.

Las altas temperaturas de la combustión producen la combinación del oxígeno y el nitrógeno para formar NO . Posteriormente, ya sea en el propio vehículo o mediante reacciones fotoquímicas, el NO se oxida para formar NO_2 .

El NO_2 puede causar irritación de los ojos y el sistema respiratorio, afectando en mayor medida a aquellos grupos de riesgo. A largo plazo puede empeorar al desarrollo pulmonar de los niños y provocar la aparición de enfermedades crónicas de tipo respiratorio. La directiva europea 50/2008/CE establece los valores límites para las concentraciones de NO_2 :

Tabla 3. Criterios de calidad del aire. Valores límite del NO_2

	Período de promedio	Valor límite
Valor límite horario	1 hora	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO_2 , que no podrá superarse más de 18 horas al año
Valor límite anual	1 año	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO_2



En las refinerías, el petróleo se procesa tratando de eliminar la presencia del azufre y otros compuestos en el combustible final. Esto es necesario tanto para evitar la corrosión de los motores como para impedir que se emitan estos contaminantes a la atmósfera.

Sin embargo, esto no puede hacerse en un 100 %, por lo que finalmente se emite SO_2 a la atmósfera. Además de causar también efectos nocivos sobre la salud, el SO_2 y los óxidos de nitrógeno se combinan con el agua formando el ácido sulfúrico y nítrico y precipitándose en forma de lluvia ácida.

➤ **Smog**

El smog sirve como un claro ejemplo de los efectos de la contaminación atmosférica. Es un tipo de contaminación que se da sobre todo en las grandes ciudades, durante un largo periodo de altas presiones, lo que provoca el estancamiento del aire y que los contaminantes de mayor densidad permanezcan en las zonas a ras de suelo.

El smog atmosférico es causante de diversas enfermedades. Como en los contaminantes anteriores, los grupos más expuestos son sobre todo ancianos y niños. El smog afecta al sistema cardiorrespiratorio, por lo que aquellos que sufren de asma o alguna afección de ese tipo pueden verla agravada.

Existen dos tipos de smog. Uno es el smog industrial, producido por los contaminantes primarios de los procesos industriales o de producción de energía.

El otro es el smog fotoquímico, producido por contaminantes secundarios, como óxidos de nitrógeno e hidrocarburos volátiles, que reaccionan inducidos por la luz solar. Este proceso genera ozono y otros elementos, como el PAN (nitrato de peroxiacetilo), que son compuestos tóxicos y cancerígenos. Unos ejemplos más visuales del smog pueden observarse en la Figura 5.



Figura 5. Smog contaminante sobre Madrid y Los Angeles



Para prevenir la contaminación, algunos países establecen restricciones a la circulación. En México, por ejemplo, en función del número de la matrícula los vehículos tienen prohibido conducir ciertos días. Los vehículos híbridos y eléctricos suelen librarse de estas restricciones, esta es otra de sus ventajas que comentaremos en el posterior *Estudio de Viabilidad Económica*.

Por último, aunque también puede atribuirse a otros factores, la contaminación atmosférica se considera uno de los causantes del aumento de la población alérgica, que ha pasado de un 5 % en 1970 hasta más de un 20 % en la actualidad.

3.3. El ruido

Aunque muchas veces no se le da la importancia necesaria, otro de los factores a tener en cuenta es el ruido. El motivo de que se le suela atender en un segundo plano es debido a que en muchas ocasiones no lo percibimos de forma evidente y sus efectos son a largo plazo.

Sin embargo, está demostrado que afecta de manera importante a la calidad de vida. El ruido causa estrés, déficit de atención, ansiedad, irritabilidad, dolores de la cabeza y alteraciones del sueño.

Como puede verse en la Figura 6, el ruido está principalmente causado por los vehículos.

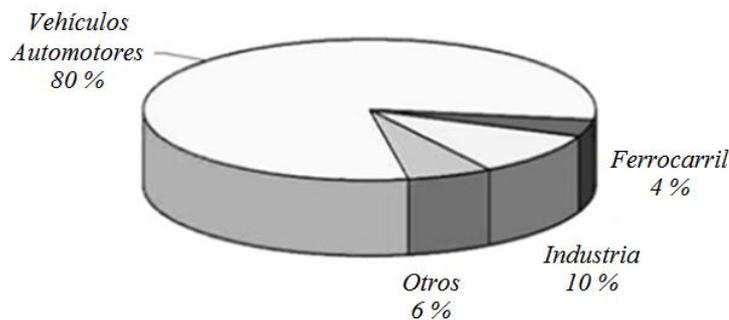


Figura 6. Elementos culpables del ruido

Dados estos porcentajes, el uso del vehículo eléctrico reduciría de forma significativa el ruido, aumentando nuestra calidad de vida, incluso si no somos conductores habituales.



4. CONTAMINANTES DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO. BATERÍAS.

El vehículo eléctrico es más simple, al menos mecánicamente, que el vehículo de combustión. Esto le permite dejar menos residuos al final de su vida útil, los cuales pueden ser separados en el desguace para su reciclaje, de forma semejante a la del vehículo convencional.

La principal diferencia podemos encontrarla en las baterías. Además, nuestro sistema MES-AES cuenta con la incorporación de un banco de supercondensadores. A continuación estudiaremos los impactos medioambientales de estos dos elementos.

4.1. Directiva RoHS y otras normativas

La directiva RoHS (Restriction of Hazardous Substances) fue adoptada en 2003 por la Unión Europea (directiva 2002/95/CE).

La RoHS restringe el uso de ciertas sustancias en aparatos eléctricos y electrónicos. Esta norma es aplicable a electrodomésticos, equipos de comunicaciones, aparatos de alumbrado, herramientas, juguetes, equipos deportivos... Los máximos valores de las sustancias restringidas son los siguientes:

- Cadmio y sus compuestos (0,01 %).
- Cromo hexavalente y sus compuestos (0,1 %).
- Plomo y sus compuestos (0,1 %).
- Mercurio y sus compuestos (0,1 %).
- PBB y PBDE (0,1 %).

Estos porcentajes no se aplican al peso final del producto, si no a cada componente por separado. En concreto, el banco de supercondensadores utilizado sí cumple con la directiva RoHS, como se indica en sus ventajas en el anexo N°5 *Supercondensadores*.

Se excluyen de la normativa anterior los aparatos médicos y equipos espaciales y militares. También se encuentran excluidas las baterías, ya que se rigen por su propia directiva propia directiva 91/157/CEE, relativa a las pilas y acumuladores.

Con la directiva 91/157/CEE, los estados miembros se comprometen a tomar medidas y a informar a sus ciudadanos sobre el peligro de la eliminación



incontrolada de pilas y las medidas que se debían de tomar. Además establece una nueva clasificación de sustancias peligrosas:

- 25 g de Mercurio por elemento (excepto las pilas alcalinas de manganeso)
- Cadmio (0,025 %)
- Plomo (0,4 %).

Dado el alto poder contaminante del Cadmio, las pilas y baterías de Níquel-Cadmio (NiCd) cada vez se usan menos en favor de las de Níquel Metal e Hidruro (NiMH).

Las baterías de litio que se usan este proyecto no son especialmente contaminantes y no están limitadas por esta directiva. Además, también existe la posibilidad de reciclar el litio.

4.2. Reciclado de las baterías de litio. Futuro a largo plazo de esta tecnología

Es importante tener en cuenta los impactos medioambientales y la sostenibilidad de cualquier nueva tecnología, ya que su uso masivo podría llevarnos a una situación medioambiental o energética similar a la que se trata de solventar.

Y es que no solo los vehículos eléctricos sino que gran parte de la tecnología actual (dispositivos portátiles: ordenadores, móviles, cámaras...) está tendiendo a usar el litio en sus baterías. Por otro lado, el litio actualmente se usa también para la fabricación de aluminios, vidrios, cerámicas y lubricantes. Con todo esto, es fácil de prever que su demanda y su precio subirán considerablemente a medio y corto plazo (un 35 % en el último año y medio).

Los impactos ambientales de la extracción del litio no difieren demasiado de la extracción de otros minerales: impactos en el paisaje, impacto en la flora y fauna del emplazamiento, consumo y contaminación de agua, generación de residuos sólidos y químicos, etc.

Por fortuna, el litio es un elemento relativamente abundante en la corteza terrestre. Sin embargo, no es fácil extraerlo de una forma rentable en términos energéticos y económicos. Hay muchos minerales que contienen litio, pero solo unos pocos lo poseen en cantidades comerciales. El litio también puede encontrarse en salmueras naturales.



Sus principales yacimientos se encuentran concentrados en unos pocos países: Bolivia, Chile y Argentina. Se estima que estos países concentran el 85 % de las reservas del planeta, formando una zona conocida como el triángulo del litio. Con el tiempo y el aumento de la demanda, podría darse la circunstancia de que estos países se convirtieran en países litiodólares, de forma equivalente a los países petrodólares actuales. Actualmente se especula con la posibilidad de que Afganistán posea una mayor reserva de litio que los anteriores. Existan o no grandes cantidades de litio, la falta de infraestructuras en esa zona podría retrasar su explotación.

También se ha apuntado la posibilidad de obtener litio del agua de los océanos (cuya concentración media es de un 0,0017 %). Esto se realizaría mediante osmosis inversa, aumentando la concentración de sales en el agua, para posteriormente evaporarla y obtener el litio de las sustancias restantes.

Actualmente se necesitan unos 4 kg de litio para fabricar la batería de un vehículo eléctrico, mientras que las reservas de más fácil acceso en los países anteriores albergan 39 millones de toneladas de litio. Realizando un cálculo rápido, estas cifras ya son suficientes para fabricar 100 millones de coches eléctricos anuales durante casi 100 años (actualmente se fabrican menos de 80 millones de vehículos convencionales anualmente).

Así pues, utilizando diferentes métodos para su extracción y complementándolos con su reciclado y una correcta gestión de los recursos, el suministro de litio debería estar asegurado durante mucho tiempo.

El litio de las baterías puede reciclarse en un 90-95 %. Existen dos formas de hacerlo:

- Método químico, que contamina menos pero es menos eficiente.
- Mediante fusión, empleando temperaturas superiores a 1000°C, obteniendo también otros materiales valiosos que contienen las baterías: cobalto, cobre, níquel... Este proceso tiene un mayor coste y es probable que esas temperaturas se alcanzasen mediante procesos que emiten CO₂.

Por otro lado el reciclado de las baterías es un proceso complejo, difícil de estandarizar, ya que las baterías pueden ser dispositivos relativamente sofisticados y existen muchos tipos diferentes. Por estos motivos las baterías de litio se reciclan



muchas veces de forma incongruente, desechando el propio litio y extrayendo otros metales que componen el dispositivo, como el cobalto, que tienen un mayor precio en el mercado.

Pese a lo anterior, algunos países y empresas están siendo previsores y apostando por el establecimiento de plantas para su reciclado. La estrategia de algunas empresas consiste en la compra de litio para la fabricación de baterías, para posteriormente encargarse del reciclado de estas y realimentarse del litio de sus propios productos, sin depender del posible futuro aumento del precio de este elemento.

Según la actual directiva europea, son los fabricantes los que deben financiar el coste de recogida, tratamiento y reciclado de baterías. Aunque también se ha estudiado el establecimiento de una ecotasa que tuviéramos que pagar los consumidores, de forma similar a cómo se hace con los neumáticos.

En el ámbito más local, en España va a construirse la primera planta de reciclado de baterías de ion-litio en Azuqueca de Henares, Guadalajara. En esta planta ya realizan parte del proceso de reciclaje de pilas y baterías convencionales.

En 2010 se vendieron en España más de 13.000 toneladas de pilas y acumuladores y se recogieron un total de 3320 toneladas, superando el 25 % que se marcaba la normativa europea y del estado para 2011. La misma directiva exige llegar al 45 % de reciclaje para 2015.

Como ya se ha explicado, se considera que la vida útil de las baterías de un vehículo híbrido o eléctrico termina cuando su capacidad disminuye por debajo del 80 % inicial, momento en el que se recomienda cambiarlas si queremos mantener unas prestaciones y autonomía aceptable.

Sin embargo, estas baterías desgastadas no están averiadas y todavía pueden almacenar una considerable energía eléctrica. Por lo tanto podrían ser reutilizadas en otras aplicaciones como:

- Almacenamiento de energía solar, para consumo individual o para la recarga de vehículos en electrolinerías.
- Almacenamiento individual doméstico. Consumiendo kWh nocturnos de la red (más baratos) para usar esa energía durante el resto del día.



- Almacenamiento masivo de la energía en exceso de la red (fundamentalmente la energía nocturna de tipo renovable). Este sistema consistiría en alimentar un gran número de baterías durante el horario nocturno (kWh más barato) y devolver esa energía a la red durante el día (kWh más caro).
- Sistemas de suministro de emergencia.

Una vez las baterías hubiesen agotado esta segunda vida útil pasarían a su reciclado definitivo, habiendo resultado unos dispositivos mucho más rentables.

5. IMPACTO SOBRE LA RED ELÉCTRICA

Otros de los problemas que se plantean es que, si aumentase el parque eléctrico automovilístico, las exigencias sobre la red eléctrica aumentarían. La REE (Red Eléctrica Española) asegura que el sistema eléctrico español podría soportar la demanda de 1 millón de coches eléctricos con la infraestructura actual, ya que existen horas con baja demanda (horario nocturno), donde nuestra capacidad se encuentra infrutilizada.

Si la recarga de vehículos fuese fundamentalmente nocturna aumentaríamos nuestra eficiencia, aprovechando los valles actuales en la demanda. Además, el aumento del número de vehículos eléctricos permitiría un mejor aprovechamiento de las energías renovables. Por ejemplo, el viento sopla mucho por la noche sin haber apenas demanda, desperdiándose parte de esa energía eólica.

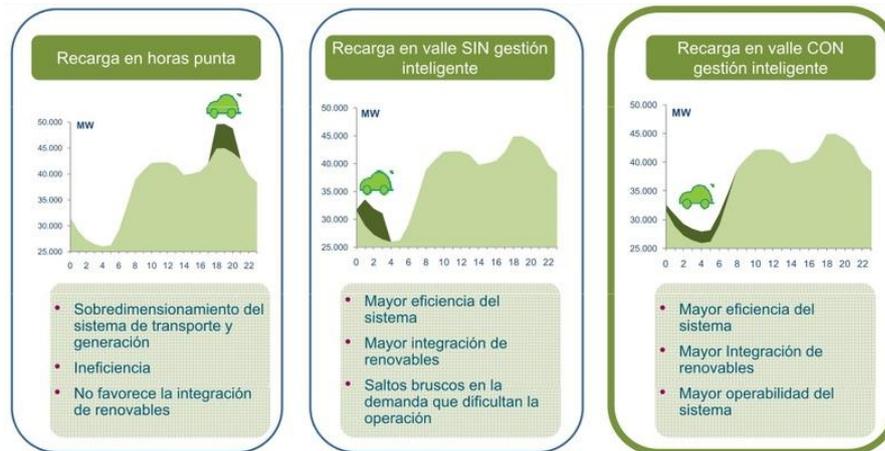
El uso actual que se puede hacer de esta energía nocturna consiste en utilizarla para bombear agua en las centrales hidráulicas, consiguiendo así almacenar esta energía para usarla más adelante, cuando la demanda aumente en las horas punta.

Las baterías de los vehículos eléctricos podrían funcionar de modo similar a los embalses, permitiendo aprovechar esa energía que de otra forma no sería utilizada, funcionando como un gran almacén energético, repartido entre todos los consumidores.

También existen sistemas que permiten que el vehículo eléctrico suministre energía al hogar, recargándose las baterías por la noche y descargándose durante el día. En el caso de una interrupción en el suministro eléctrico las baterías actuales son capaces de proporcionar energía durante aproximadamente dos días a un hogar medio.



Como la recarga nocturna con las tarifa valle y supervalle es más barata, es de suponer que todos los consumidores desearán recargar durante esos periodos, evitando las recargas en las horas punta. Para facilitar esto al usuario, los cargadores pueden incorporar un temporizador con el que se indica el inicio de la recarga. Una explicación gráfica de las ventajas de este método de recarga puede verse en la Figura 7.



El proyecto REVE (Regulación Eólica con Vehículos Eléctricos) se encarga de este estudio. Resumiendo, las ventajas de este sistema serían:

- Aumento de la demanda nocturna.
- Aumento de la eficiencia general del sistema
- Mejor aprovechamiento de las energías renovables

El principal problema para este sistema es la falta de infraestructura para la recarga de vehículos eléctricos. Los cargadores actuales utilizan una potencia de 3 a 7 kW (16-32 A), recargando el vehículo en 4-8 horas. Los postes domésticos y públicos tendrían un coste entre 400 y 1000 €. En España, se calcula que la construcción de la infraestructura suficiente supondría un total de entre 250 y 300 millones de euros. También habría que incluir puntos de 50 kW para las recargas rápidas.

Para utilizar una mayor energía limpia, estos lugares para la recarga también podrían acumular energía mediante paneles solares. Este sistema también sería útil para establecer electrolíneas en lugares alejados de la red.



6. CONCIENCIA MEDIOAMBIENTAL. EL VEHÍCULO ELÉCTRICO

Otro punto a tener en cuenta a la hora de estimar las ventas de un producto como el vehículo eléctrico es la conciencia medioambiental de los compradores. El grado de concienciación ha venido creciendo en las últimas décadas, lo cual podría ser un gran impulso para las ventas de vehículos eléctricos en un futuro.

Sin embargo, este espíritu ecológico muchas veces se queda sin dar frutos reales. En España, aunque todos los encuestados otorgan a la protección del medioambiente una gran importancia, en la práctica, esto no se ve reflejado en la economía real. Es decir, existe una gran distancia entre la dimensión afectiva (preocupaciones de los compradores) y la dimensión activa (su comportamiento final).

Por ejemplo los productos locales, más caros, se venden menos que aquellos transportados desde lugares lejanos. El lugar de procedencia no suele mirarse o se le da una importancia mucho menor que al precio del producto. De la misma forma, por mucho que el vehículo eléctrico pudiera ser menos contaminante, se prefiere un vehículo diésel o híbrido, más barato y con mejores prestaciones. Algunos datos que ponen en relevancia la posible falta de concienciación real son los siguientes:

- Según datos del CIS del 2007, a la hora de establecer prioridades de protección medioambiental las medidas más prioritarias obtenidas fueron: reducir el consumo de energía en el hogar (49 %), reciclaje (48 %) y uso del transporte público (42 %). Mientras que la compra de un vehículo más pequeño o caro pero más eficiente o la adquisición de productos locales obtuvieron un porcentaje menor (14 % y 9 %, respectivamente). Como se puede deducir, las medidas relativas a la movilidad son consideradas importantes, pero son desplazadas por las relativas al hogar.
- Nuevamente según datos del CIS, se prefieren las campañas de ahorro de agua (43 %) o electricidad (34 %) frente a incentivar el uso del transporte público (24 %). Las políticas que restringen de alguna forma el uso del vehículo propio tienen poca aceptación (12 %), incluso cuando no todos los encuestados son conductores habituales.
- Según la encuesta de la Fundación BBVA de 2007, hasta un 59 % se mostraba en contra de aumentar los impuestos de la gasolina para reducir el uso del vehículo convencional (sólo un 28 % estaba de acuerdo).



- Según la Encuesta XI del RACC (Real Automóvil Club de Cataluña) en 2008, el 74 % de los conductores no se habían informado sobre los efectos medioambientales de su vehículo a la hora de adquirirlo.
- Según la RACE (Real Automóvil Club de España), el 40 % se niega a pagar más por un vehículo de menos prestaciones. En general, los encuestados demandan subvenciones estatales y tarifas especiales.

Aunque estos datos puedan parecer un tanto pesimistas, podemos considerar que se deben a que los conductores rechazan cualquier tipo de desembolso adicional, ya sea en el precio de adquisición de un vehículo eléctrico o una subida en los impuestos de los combustibles convencionales. Es decir, la conciencia medioambiental sigue existiendo, aunque no siempre se lleve a la práctica.

Tal vez uno de los problemas para la proliferación del vehículo eléctrico se encuentra en la falta de conocimiento sobre él. Es importante remarcar que un 90 % de los españoles considera que la información recibida sobre las características de estos vehículos es escasa y confusa, aunque un 87 % se manifiesta a favor de ellos.

Según la RACE, los inconvenientes a los que se da mayor importancia son la falta de puntos de recarga (29 %), la falta de autonomía (25%) y el alto precio de adquisición (19%). Por lo tanto, si se redujeran parte de estos tres principales inconvenientes, no hay motivos para pensar que el vehículo eléctrico no lograría abrirse paso en el mercado.

Como ejemplo real y actual, los vehículos híbridos sí están consiguiendo una gran aceptación gracias a que no presentan los problemas de recarga o baja autonomía propios de un eléctrico puro, y gracias al aumento de su demanda sus precios han bajado, eliminando el tercer problema.



7. CONCLUSIONES

El vehículo eléctrico es más eficiente y menos contaminante que el vehículo convencional, tanto localmente como globalmente. Al acabar su vida útil el vehículo eléctrico deja menos residuos, ya que las baterías pueden reutilizarse en diferentes aplicaciones y también pueden reciclarse.

La red eléctrica española, infrutilizada en el horario nocturno, puede soportar un crecimiento moderado del parque eléctrico automovilístico sin necesidad de una gran inversión en infraestructuras.

Por cada vehículo eléctrico vendido, se emite aproximadamente 1 tonelada anual menos de CO₂. El positivo impacto medioambiental de nuestro proyecto, vendría dado en función del aumento de las ventas de vehículos eléctricos debido a las mejoras que el sistema MES-AES diseñado podría proporcionar sobre las prestaciones actuales.

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ANEXO N°6

APLICACIÓN PRÁCTICA:

**SOLUCIÓN ADOPTADA
PARA EL SISTEMA DE POTENCIA**

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. CONVERTIDOR ESTÁTICO CC/CC.....	3
2.1. Tensión variable.....	3
2.2. Gestión del estado de carga (SOC) del supercondensador.....	4
2.3. Funcionamiento específico como AES.....	4
2.4. Convertidor CC/CC elegido.....	5
3. MOTOR BRUSHLESS E INVERSOR.....	5
3.1. Selección del motor.....	6
4. CONCLUSIONES.....	7



1. INTRODUCCIÓN

A partir del estudio realizado, hemos concluido en la necesidad de implementar un sistema MES-AES como solución a los problemas del vehículo eléctrico.

Esta solución está constituida por un sistema principal de energía (MES) basado en baterías de ion-litio y un sistema auxiliar de energía (AES) que consiste en un banco de supercondensadores.

Ahora bien, para combinar ambos sistemas de forma eficiente vamos a necesitar también una serie de dispositivos adicionales, como puede verse en la Figura 1.

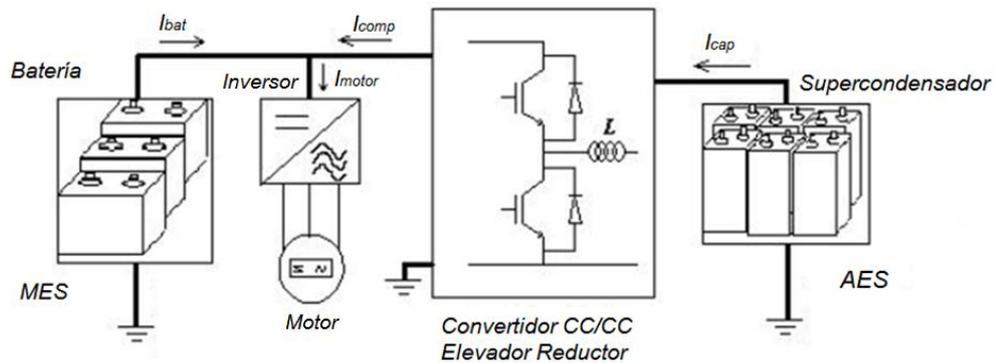


Figura 1. Sistema MES-AES. Incluye el convertidor, inversor y motor

Nuestro vehículo tendrá una topología serie, es decir que empleará un solo sistema mecánico, propulsado únicamente mediante energía eléctrica.

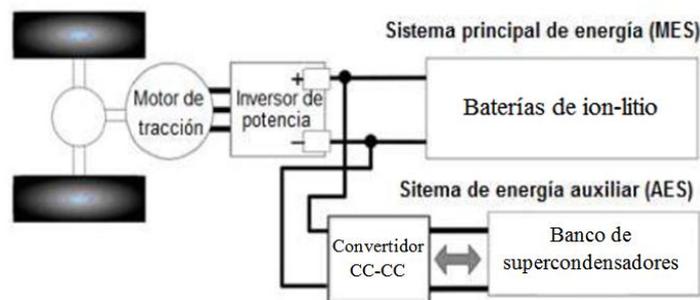


Figura 2. Topología serie del sistema

En otros anexos ya hemos descrito las baterías de litio y los supercondensadores. A continuación hablaremos de los dispositivos adicionales necesarios para el sistema MES-AES.



2. CONVERTIDOR ESTÁTICO CC/CC

El convertidor estático CC/CC es el dispositivo que nos va a permitir conectar el supercondensador al resto del sistema. El supercondensador no debe conectarse directamente al motor ni a las baterías por las siguientes razones:

1. La tensión del supercondensador es variable.
2. La necesidad de controlar el estado de carga del supercondensador.
3. Por su funcionamiento como sistema AES.

2.1. Tensión variable

La tensión de trabajo de la batería es aproximadamente constante, mientras que la tensión del supercondensador va a ser mucho más variable, como puede verse en la Figura 3. La batería puede tardar en descargarse varias horas (ej.: 200 km de conducción), mientras que el supercondensador puede cargarse y descargarse en menos de 1 minuto, al realizar aceleraciones y frenados regenerativos.

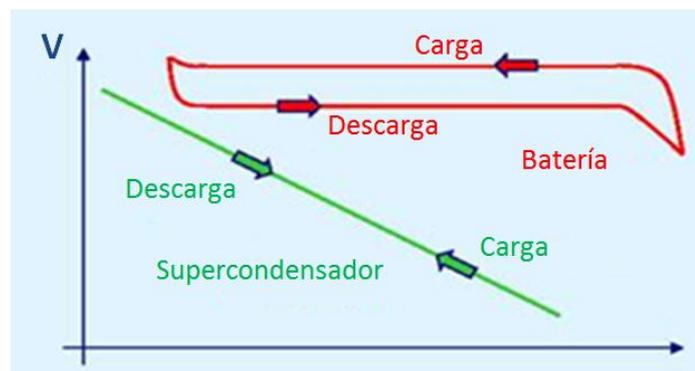


Figura 3. Variación de la tensión en baterías y supercondensadores

Por este motivo se necesita un sistema que controle la tensión y que pueda transferir energía entre una fuente de tensión aproximadamente constante (batería) y otra variable (supercondensador), tanto en situaciones de elevación como de reducción de tensión.



2.2. Gestión del estado de carga (SOC) del supercondensador

Cuando el vehículo circula a baja velocidad el estado de carga del supercondensador debe ser alto (reservando la energía para una aceleración), mientras que a alta velocidad su estado de carga debe ser bajo (preparándose para recibir energía del frenado). Es decir que a 0 km/h el SOC estará al 100 % y a 120 km/h debería estar cerca del 0 % (en realidad con el sistema de control impediremos que baje del 30 %, para evitar sobrecorrientes). Como se puede deducir, a una velocidad intermedia, donde el sistema no puede predecir si a continuación se realizará una aceleración o un frenado, el estado de carga será intermedio, dependiendo de la velocidad.

Para poder gestionar la carga es necesario poder transferir energía de la batería al supercondensador y viceversa (ver Figura 4), necesitando de un convertidor CC/CC bidireccional entre ambos.

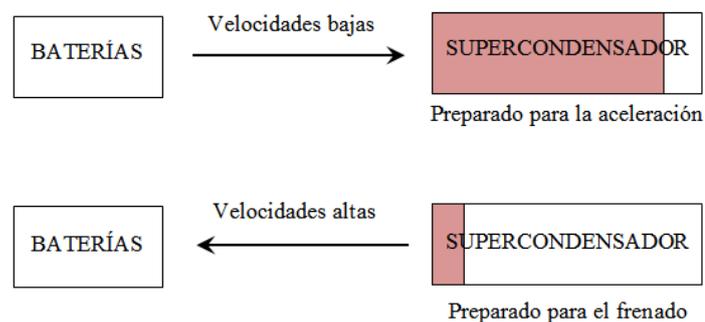


Figura 4. Gestión del estado de carga del supercondensador

El estado de carga del supercondensador también puede depender otras variables. En este proyecto se han desarrollado diferentes modos de gestión del SOC: Normal, Deportivo, Escalada y Descenso. Estos modos de funcionamiento alteran el estado de carga del supercondensador para adaptarlo a determinadas situaciones de conducción, para saber más ver el anexo N° 10, *Desarrollo del Algoritmo de Control*.

2.3. Funcionamiento específico como AES

La función del supercondensador como sistema AES es la de intercambiar energía durante frenados y aceleraciones, que son fenómenos transitorios, de corta duración. No debe estar conectado durante tiempos prolongados, intercambiando energía sin ningún motivo. Como hemos dicho, debe mantener un estado de carga concreto, para cumplir satisfactoriamente la función específica para la que ha sido implementado.



2.4. Convertidor CC/CC elegido

Los apartados 2.1, 2.2 y 2.3 anteriores justifican la necesidad de un convertidor CC/CC, a la vez que introducen algunos de los requisitos que se le exigen. En el anexo N°7, *Convertidores CC-CC para sistema MES-AES* se analizan diferentes soluciones, añadiendo otros requisitos como el peso o el precio. También se incluye un estudio matemático del convertidor CC/CC final elegido, que es el correspondiente al que aparece en la Figura 1 de este anexo.

3. MOTOR BRUSHLESS E INVERSOR

Los motores brushless no necesitan de escobillas para invertir la polaridad en el rotor. Esto proporciona numerosas ventajas frente a los motores que sí emplean escobillas, ya que el rozamiento genera mayores pérdidas por calor (menor rendimiento) y además requieren de un mayor mantenimiento (desgaste, suciedad, recambio de escobillas...).

Inicialmente, los motores sin escobillas eran los de corriente alterna asíncronos. En este tipo de motores es la corriente alterna a través de las bobinas inductoras del estator desfasadas 120° la que se encarga de generar el campo magnético giratorio. Este campo induce una tensión en el rotor, produciendo su movimiento, que trata de alcanzar la velocidad de rotación del campo magnético del estator.

Actualmente, gracias a los avances de la electrónica, se puede alimentar estos motores con corriente continua (proveniente de nuestro supercondensador y baterías) utilizando electrónica de potencia. Para ello será necesario un inversor (Figura 5) que tome la corriente continua y la transforme en alterna a la frecuencia deseada, en función de la velocidad deseada en el vehículo.

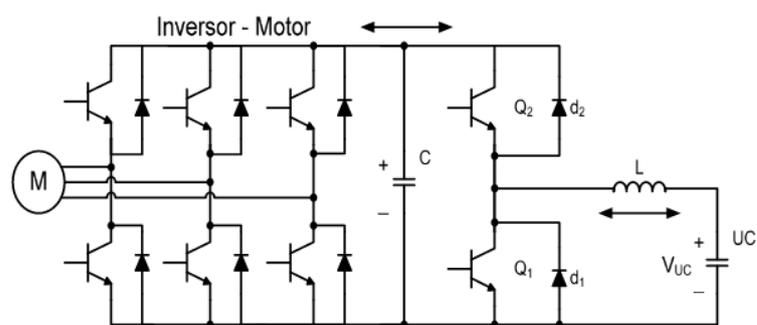


Figura 5. Motor, inversor, convertidor CC/CC elegido y supercondensador



Otro aspecto a tener en cuenta en nuestro diseño es que si la batería se encontraba cargada y se aplica el frenado regenerativo no sólo puede dañarse la batería, sino también otros elementos como el inversor. Para evitar esto una opción es controlar la tensión y limitar la corriente absorbida por la batería, pero esto afectaría gravemente al rendimiento del vehículo, ya que no aprovecharía toda la energía del frenado.

De esta forma se refuerza la importancia del supercondensador, ya que su gran capacidad para absorber el frenado regenerativo evita también este nuevo problema.

3.1. Selección del motor

En el apartado 1.1.1 del anexo N°3, *Estudio justificativo de la solución a adoptar*, se calculó que para una aceleración 40-100 km/h en 7 segundos son necesarios 81 kW (ver Ecuación 1.5 del anexo N°3). A la hora de seleccionar el motor hemos tratado de aproximarnos lo más posible a ese valor.

Finalmente, entre los motores disponibles en la Tabla 1, hemos elegido un motor de 75 kW (100 CV), que es la potencia que hemos considerado necesaria para que el vehículo alcance unas prestaciones comerciales aceptables.

En este trabajo, el sistema ha sido desarrollado para el caso concreto de un vehículo de 1400 kg. Sin embargo, gran parte del diseño realizado puede reutilizarse para otros casos. Para un vehículo de mayor o menos masa elegiríamos un motor diferente, en función de las prestaciones deseadas.

Tabla 1. Motores Czerweny S.A. Motores asíncronos trifásicos

Tipo	P _n		n v/min	I _n 380V	I _a /I _n	η %	Cos φ	M _a /M _n	M _r /M _n	J kgm ²
	KW	CV								
1D225M-2	45	60	2955	82	7	93,0	0,9	2,5	3,0	0,233
1D250M1-2	55	75	2960	102	7,2	93	0,9	2,4	2,8	0,312
1D280S-2	75	100	2970	135	7	93,7	0,9	2,2	3,4	0,597
1D280M1-2	90	125	2975	160	6,9	94,1	0,91	2,3	3,2	0,675

Todos los motores anteriores son aptos para ser usados con un variador de velocidad, según requerimiento de la norma IEC 600-34-1. Para invertir el sentido de giro se cambia la secuencia de disparo en los semiconductores del inversor de la Figura 5, permutando dos fases.



4. CONCLUSIONES

Resumiendo, nuestro sistema de potencia MES-AES utilizará los siguientes elementos:

- Paquete de baterías de ion-litio, base del sistema MES, que almacena la mayor parte de la energía, buscando una mayor autonomía.
- Banco de supercondensadores, base del sistema AES, que aporta la potencia para aceleraciones y frenados regenerativos, mejorando el rendimiento global y aumentando la vida útil de las baterías.
- Convertidor CC elevador-reductor bidireccional. Para introducir o extraer energía del supercondensador de tensión variable en los momentos en los que sea necesario.
- Inversor. Para que el motor AC pueda utilizar la energía de corriente continua proporcionada por las baterías y supercondensadores.
- Motor. Para cumplir los requisitos de aceleración estimados se ha seleccionado un motor de 75 kW.

Por último, recordamos que el motor e inversor no se diseñan en este proyecto, pero son tenidos en cuenta para el desarrollo del resto del sistema.

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ANEXO N°7

APLICACIÓN PRÁCTICA:

**CONVERTIDORES CC-CC
PARA SISTEMA MES-AES**

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1. REQUISITOS DEL CONVERTIDOR	2
2. TOPOLOGÍAS DE CONVERTIDOR CC	3
2.1. Convertidor CC/CC de 1º y 2º cuadrante	4
2.2. Convertidor CC/CC elevador-reductor bidireccional en cascada.....	5
2.3. Convertidor CC/CC elevador-reductor con 4 interruptores.....	6
2.4. Convertidor CC/CC mediante conmutación de condensadores	7
3. SELECCIÓN DEL CONVERTIDOR CC/CC.....	8
4. ARQUITECTURA FINAL CON EL CONVERTIDOR CC/CC ELEVADOR-REDUCTOR ELEGIDO. ESTUDIO MATEMÁTICO.	9
5. CONCLUSIONES.....	13



1. REQUISITOS DEL CONVERTIDOR

En el apartado 2 del anexo N°6, *Solución Adoptada para el Sistema de Potencia*, se analiza la necesidad de un convertidor CC-CC para intercambiar energía entre el sistema AES y el sistema MES y el propio motor.

El supercondensador debe poder proporcionar energía en las aceleraciones y absorberla en los frenados. También debe poder intercambiar energía con las baterías para mantener un estado de carga adecuado, ver Figura 1. A altas velocidades debía estar descargado (preparado para absorber energía de un frenado) y a bajas velocidades debe estar cargado (preparado para proporcionar la energía para acelerar).

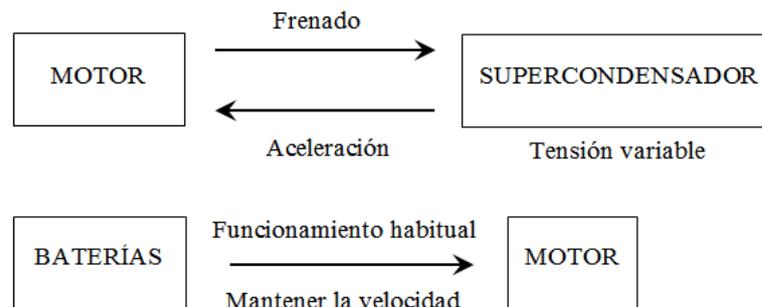


Figura 1. Funcionamiento general del vehículo

La tensión nominal del paquete de baterías será de 360 V, mientras que la tensión máxima del supercondensador se situará en 307,8 V. Los motivos y cálculos que justifican estos valores se detallan en el anexo N° 8, *Desarrollo del Sistema de Potencia*.

Además, la tensión del supercondensador es mucho más variable, por lo que para evitar que se cruce con la tensión de la batería la mantendremos siempre por debajo. Así pues, deberemos elevar la tensión del supercondensador (situada en un máximo de 307,8 V) y reducir la de las baterías (cuyo mínimo cuando queda menos de 10 % de la carga serán aproximadamente 336 V).

En definitiva, necesitaremos de un **Convertidor CC/CC elevador-reductor bidireccional**, capaz de invertir la corriente.



2. TOPOLOGÍAS DE CONVERTIDOR CC

Los convertidores CC/CC pueden clasificarse en tres clases fundamentales, según los cuadrantes intensidad-tensión en los que pueden funcionar.

- **Clase A.** Son los convertidores más sencillos. Trabajan en 1 solo cuadrante (corriente en un mismo sentido y misma polaridad).
- **Clase B.** Son capaces de funcionar en 2 cuadrantes (invirtiendo la tensión o corriente).
- **Clase C.** Este tipo de convertidores tiene la capacidad de funcionar en los 4 cuadrantes (invirtiendo tensión e intensidad).

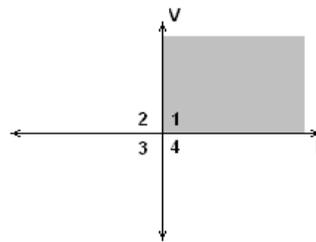


Figura 2. Convertidor de clase A. Funcionamiento en un solo cuadrante

En nuestro caso, necesitamos un convertidor elevador-reductor, por lo que topologías exclusivamente reductoras o elevadoras (Figura 3.1 y 3.2) quedan descartadas. Además, el supercondensador debe poder entregar o absorber energía de forma bidireccional, por lo que los convertidores elevadores-reductores de Clase A como el de la Figura 3.3 también quedan descartados, al no poder invertir la corriente.

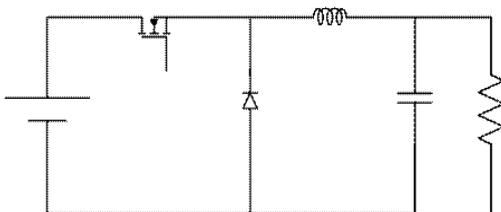


Figura 3.1. Convertidor CC-CC reductor

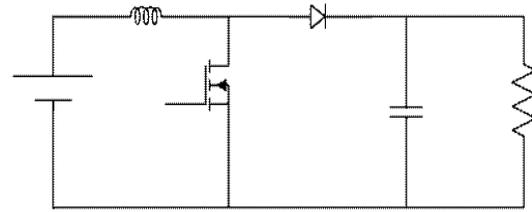


Figura 3.2. Convertidor CC-CC elevador

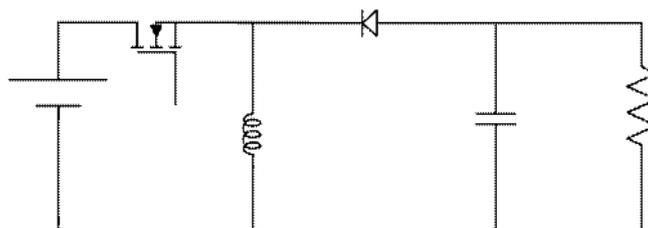


Figura 3.3. Elevador-reductor Unidireccional



Por otro lado, los convertidores CC/CC que usan transformador podrían ser una buena solución eléctrica, pero el alto peso del transformador los hace poco indicados para el vehículo eléctrico, donde la reducción del peso es vital para garantizar una mayor autonomía y prestaciones.

Los convertidores de clase C emplean un mayor número de semiconductores, y no vamos a necesitar trabajar en los 4 cuadrantes. Un circuito con un mayor número de elementos no sólo encarecería la solución, si no que complicaría su control.

Así pues la opción más simple y barata se trata de un convertidor elevador-reductor de clase B, capaz de trabajar en 2 cuadrantes (invirtiendo la corriente). No nos interesan aquellos capaces de invertir la tensión, ya que el cambio de polaridad dañaría nuestro supercondensador. A continuación se analizan algunos convertidores CC/CC que podrían ser válidos para la aplicación.

2.1. Convertidor CC/CC de 1º y 2º cuadrante

Es capaz de trabajar en 2 cuadrantes invirtiendo la corriente. De esta forma podríamos proporcionar energía al supercondensador, para después extraerla. Además es un convertidor elevador-reductor.

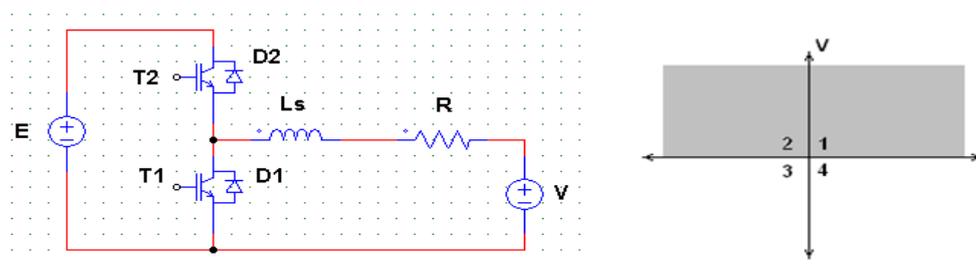


Figura 4. Convertidor CC-CC capaz de trabajar en 2 cuadrantes invirtiendo la corriente

Si observamos las figuras 3.1 y 3.2 se asemeja a un convertidor reductor visto desde la fuente y a un convertidor elevador visto desde la carga.

T2 y D1: Entrega energía a la carga (supercondensador) en modo reductor. Modo de funcionamiento (2) en la Tabla 1, que se muestra más adelante.

T1 y D2: Se recupera energía de la carga, trabajando en modo elevador. Modo de funcionamiento (3) en la Tabla 1.



- Ventajas:
 - Rendimiento alto, pudiendo alcanzar el 90 %.
 - Tamaño y peso reducido, ya que no emplean transformador.
- Desventajas:
 - Generación de EMI (interferencias electromagnéticas), desde conducida hasta incluso radiada.
 - Aumento de las pérdidas con el aumento de la frecuencia.

Ya que puede funcionar de forma bidireccional, así como en modo elevador-reductor, esta será la **topología de convertidor CC/CC elegida para nuestro sistema MES-AES**. También se han analizado otras topologías alternativas, que se exponen a continuación.

2.2. Convertidor CC/CC elevador-reductor bidireccional en cascada

Visible en la Figura 5, es semejante al anterior. S1 y D4 forma el bloque reductor. D3 y S2 forma el bloque elevador. S2 y S3 se activan de forma alterna para evitar cortocircuitos.

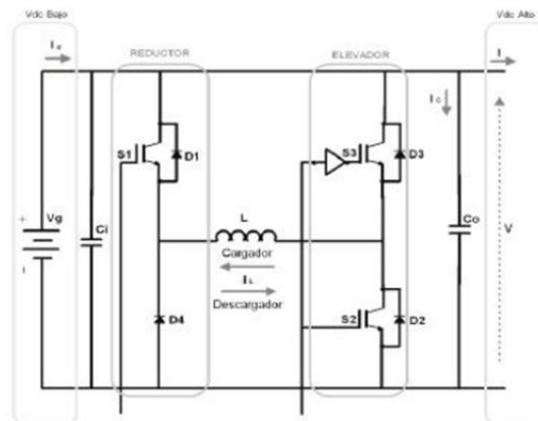


Figura 5. Convertidor CC-CC elevador-reductor bidireccional en cascada

Este convertidor está pensado para trabajar con una tensión baja a la izquierda (baterías) y una tensión alta a la derecha (red o instalación). Está preparado para elevar la tensión de las baterías para alimentar la instalación cuando hay un corte y reducir la tensión de la red para cargar las baterías. En total abarca los modos de funcionamiento (1), (2) y (4) de la Tabla 1.



Para adaptarlo a nuestra aplicación debemos colocar el supercondensador en lugar de las baterías (a la izquierda), y las baterías en lugar de la red (a la derecha). Su principal desventaja es que emplea un mayor número de elemento que el anterior.

2.3. Convertidor CC/CC elevador-reductor con 4 interruptores

Semejante a los anteriores, este convertidor CC/CC visible en la Figura 6 puede presentar un mayor número de modos de funcionamiento.

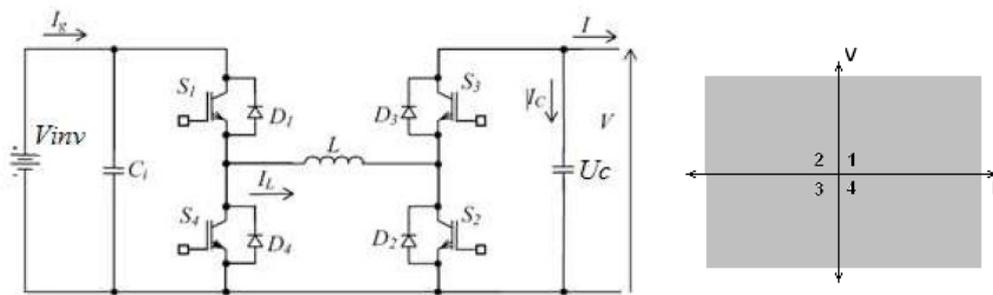


Figura 6. Convertidor CC-CC elevador-reductor con 4 interruptores (Clase C)

Empleando todos los semiconductores puede funcionar de forma bidireccional, entregando energía tanto a la carga como a la fuente, pudiendo ser ambos de una tensión mayor o menor. Es decir en este tipo de convertidor CC/CC podemos colocar el supercondensador a la derecha y las baterías a la izquierda del circuito o viceversa, sin importarnos si la tensión de uno es mayor que la del otro, ya que contempla todos los modos de operación posible, tal como se agrupan en la Tabla 1.

Tabla 1. Modos de funcionamiento de convertidores CC-CC con 4 interruptores. (También puede usarse para comparar los convertidores anteriores)

Modos de funcionamiento		Interruptores			
Entrega de energía a la carga		1	2	3	4
Modo elevador (1)	Carga L	S1	S2	Off	Off
	Descarga L	S1	Off	D3	Off
Modo reductor (2)	Carga L	S1	Off	D3	Off
	Descarga L	Off	Off	D3	D4
Recuperación de energía de la carga		1	2	3	4
Modo elevador (3)	Carga L	Off	Off	S3	S4
	Descarga L	D1	Off	S3	Off
Modo reductor (4)	Carga L	D1	Off	S3	Off
	Descarga L	D1	D2	Off	Off



Sin embargo, dado que la tensión máxima del supercondensador no va a superar la de las baterías esto no va a ser necesario, por lo que estaríamos recurriendo a un sistema más costoso que emplea más elementos de los necesarios. Es decir, un convertidor CC/CC capaz de cumplir los modos de funcionamiento (2) y (3) de la Tabla 1, como el del apartado 2.1 será suficiente.

2.4. Convertidor CC/CC mediante conmutación de condensadores

Otra alternativa a los convertidores anteriores son aquellos basados en la conmutación de condensadores. Este tipo de convertidores se fundamenta en la conexión en serie o paralelo de varios condensadores.

- Conectándolos en serie para después conectarlos en paralelo reducimos la tensión (modo reductor).
- Conectándolos en paralelo para después conectarlos en serie aumentamos la tensión (modo elevador).

Pueden funcionar de forma bidireccional, invirtiendo la corriente para $E > V$. Una forma de implementar este sistema en este caso sería sustituyendo los condensadores de la Figura 7.1 por agrupaciones de células de nuestro supercondensador.

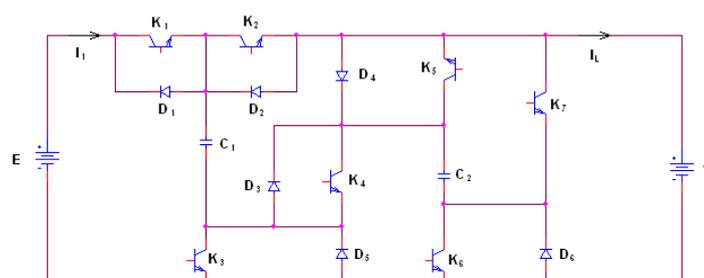


Figura 7.1 Convertidor CC-CC basado en la conmutación de condensadores

- Ventajas y características:
- A diferencia de los anteriores, no presenta bobinas. Este hecho reduce el peso, el tamaño y el coste, alcanzando una mayor densidad de potencia.
 - Rendimiento elevado.
 - Las constantes de tiempo son pequeñas, trabajando a frecuencias de 5-10 kHz y al no disponer de elementos inductivos las emisiones electromagnéticas son menores.



➤ Desventajas:

- Emplean una mayor cantidad de semiconductores.
- La relación entre la tensión de la fuente y la carga está limitada a números enteros (múltiplos de 2-3 para el caso de la Figura 7.1).

Se podría aumentar el número de condensadores aumentando los valores de tensión proporcionables, pero todo ello complicaría el circuito, el control y elevaría el número de semiconductores. Un ejemplo de esta posibilidad puede examinarse en la Figura 7.2.

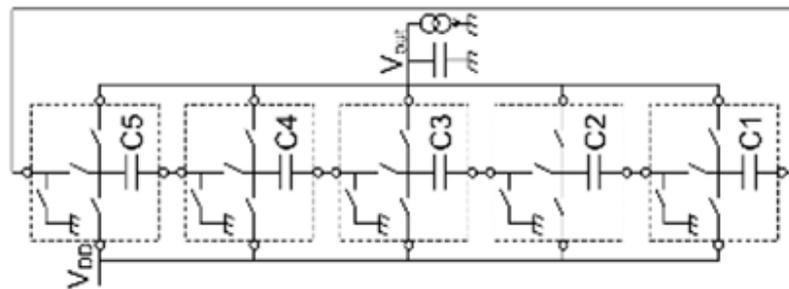


Figura 7.2. Convertidor CC-CC mediante condensadores, orientado a pequeña electrónica

Esta puede ser una buena solución para la pequeña electrónica, pero dado las altas energías que se tienen que intercambiar entre las baterías, motor y supercondensador no es una solución válida.

3. SELECCIÓN DEL CONVERTIDOR CC/CC

Los convertidores de clase A y las topologías incapaces de invertir la corriente y funcionar en modo elevador-reductor han quedado descartados, ya que no son capaces de cumplir los requisitos para el correcto funcionamiento del sistema.

Por otro lado, los convertidores CC-CC que utilizan transformadores no han sido analizados. Su mayor número de elementos inductivos aumentaría el peso del sistema MES-AES, por lo que no han sido considerados como los más idóneos para ser aplicados en los vehículos eléctricos.



Los convertidores basados en conmutación de condensadores o aquellos que utilizan un alto número de elementos (Clase C) han sido descartados, por ser más complejos así como por razones económicas.

Finalmente, debido a nuestras necesidades utilizaremos un convertidor CC/CC de clase B, ya que además de cubrir nuestros requisitos es el sistema más simple (barato y fácil de controlar) de todos los estudiados.

4. ARQUITECTURA FINAL CON EL CONVERTIDOR CC/CC ELEVADOR-REDUCTOR ELEGIDO. ESTUDIO MATEMÁTICO.

Ya que el motor y el inversor van a ser adquiridos, la arquitectura del sistema a diseñar es la visible en la Figura 12.

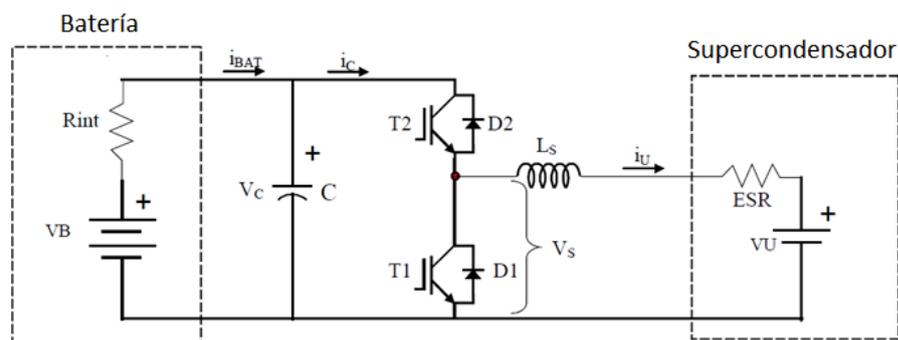


Figura 12. Arquitectura básica del sistema MES-AES

Simplificando los modelos de los elementos, la batería puede verse como una fuente de tensión constante y una resistencia interna. El supercondensador también puede verse como una fuente de tensión constante para cortos periodos de tiempo. La resistencia de las múltiples células de su interior, ya sea un montaje exclusivamente serie o mixto, pueden reducirse a una resistencia equivalente en serie (ESR).

El condensador C que se incluye en la Figura 12 sirve para reducir las sobretensiones, protegiendo a los semiconductores. También realiza funciones de filtro paso bajo para reducir el rizado de la corriente de la batería. El valor concreto de cada uno de los elementos se calculará en el siguiente anexo, *Desarrollo del Sistema de Potencia*.



El funcionamiento del convertidor CC/CC elegido es el siguiente:

➤ **Operación de Reducción (Buck)**

La energía se transfiere hacia el supercondensador, proveniente de las baterías o del frenado regenerativo. La operación de reducción corresponde al modo de funcionamiento (2) en la Tabla 1.

Para ello primero con T2 ON se carga la bobina Ls. Después con T2 OFF la energía almacenada en la bobina circula a través de D1, tal como se ve en la Figura 13.

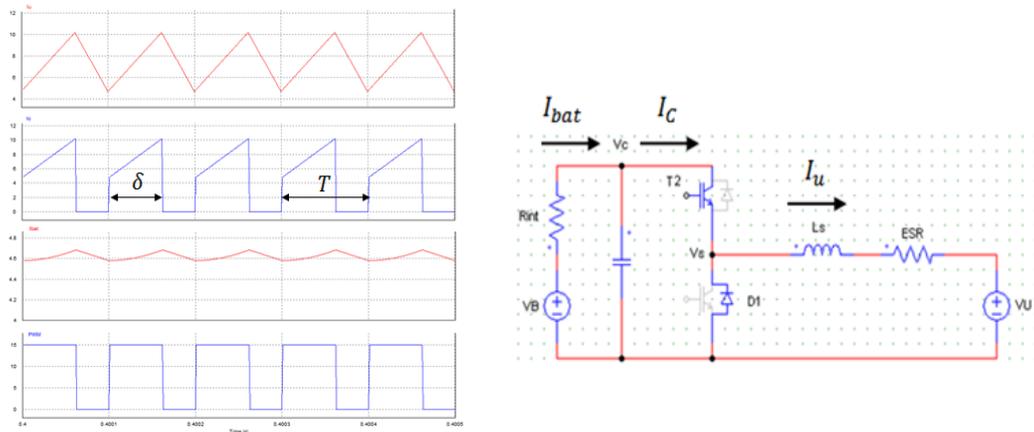


Figura 13. Operación Buck (Reductor). Simulación y circuito. Gráficas correspondientes a I_u , I_c , I_{bat} y PWM, en orden descendente

La relación entre las tensiones representadas en la Figura 13 es la siguiente:

$$V_s = \delta \cdot V_C \tag{1.0}$$

Donde δ es el ciclo de trabajo de T2. La corriente por las baterías tendrá la siguiente expresión:

$$I_{BAT} = \frac{V_s - V_U}{ESR} = \frac{\delta V_C - V_U}{ESR} \tag{1.1}$$

Si tenemos en cuenta la resistencia interna de las baterías:

$$V_C = V_B - I_{BAT} \cdot R_{int} \cdot \delta \tag{1.2}$$

Sustituyendo en la ecuación 1.2 en 1.1:



$$I_{BAT} = \frac{\delta(V_B - I_{BAT} \cdot R_{int} \cdot \delta) - V_U}{ESR} \quad (1.3)$$

Despejando el término I_{BAT} de la ecuación 1.3 obtenemos:

$$I_{BAT} = \frac{\delta V_B - V_U}{ESR + R_{int} \cdot \delta^2} \quad (1.4)$$

Observando la ecuación 1.4, para que este funcionamiento sea posible, el ciclo de trabajo deberá guardar la siguiente relación, visible en la ecuación 1.5:

$$I_{BAT} > 0 \Rightarrow \delta V_B - V_U > 0 \Rightarrow \delta > \frac{V_U}{V_B} \quad (1.5)$$

➤ Operación de Elevación (Boost)

La energía se conduce del supercondensador hacia la batería o hacia el motor, para realizar una aceleración. La operación de elevación corresponde al modo funcionamiento (3) en la Tabla 1.

En nuestro convertidor esto se realiza primero con T1 ON, cargando la bobina L_s . Después con T1 OFF la bobina se descarga a través de D2 hacia el motor o batería, de mayor tensión que el condensador.

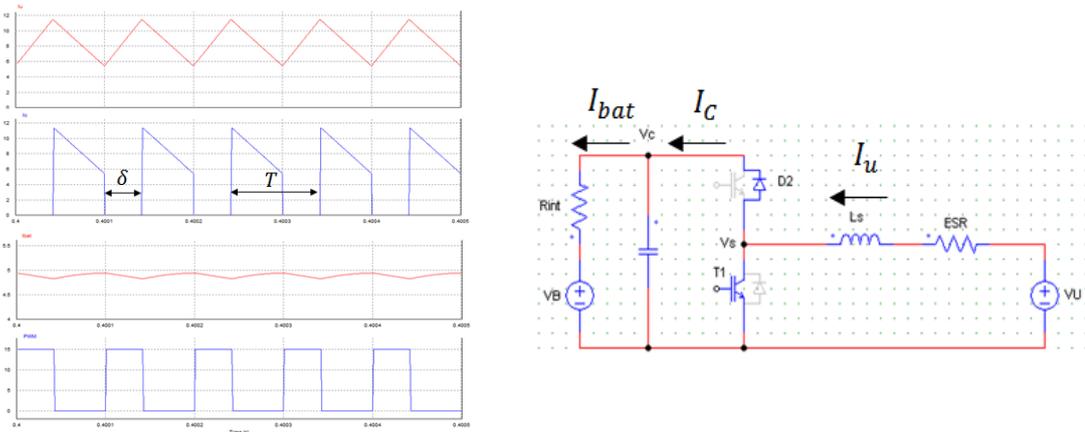


Figura 14. Operación Boost (elevador). Simulación y circuito. Gráficas correspondientes a I_u , I_c , I_{bat} y PWM, en orden descendente

La operación de elevación es posible gracias a que se cumple la ecuación 2.0.



$$V_U + V_{L_S} = V_U + \frac{L_S dI_U}{dt} > V_B \quad (2.0)$$

En este caso, las tensiones representadas en la Figura 14 guardan la siguiente relación:

$$V_C = \frac{V_s}{1 - \delta} \quad (2.1)$$

Donde δ es el ciclo de trabajo de T1. Cambiando su sentido respecto al apartado anterior la corriente por la bobina tiene la siguiente expresión.

$$I_U = \frac{V_C - V_B}{R_{int}} = \frac{\frac{V_s}{1 - \delta} - V_B}{R_{int}} \quad (2.2)$$

Si tenemos en cuenta la ESR del supercondensador:

$$V_s = V_U - I_U \cdot ESR \quad (2.3)$$

Sustituyendo en la 2.3 en 2.2:

$$I_U = \frac{\frac{V_U - I_U \cdot ESR}{1 - \delta} - V_B}{R_{int}} \quad (2.4)$$

Despejando el término I_U de la ecuación 2.4 obtenemos:

$$I_U = \frac{\frac{V_U}{1 - \delta} - V_B}{R_{int} + \frac{ESR}{(1 - \delta)^2}} \quad (2.5)$$

Observando la ecuación 2.5, para que este funcionamiento sea posible, el ciclo de trabajo deberá guardar la siguiente relación, visible en la ecuación 2.6:

$$I_U > 0 \Rightarrow \frac{V_U}{1 - \delta} - V_B > 0 \Rightarrow (1 - \delta) < \frac{V_U}{V_B} \quad (2.6)$$



5. CONCLUSIONES

Finalmente se ha elegido el convertidor CC bidireccional elevador reductor de la Figura 4, debido a su mayor simplicidad. Se ha analizado matemáticamente su funcionamiento, comprobando que es capaz de cumplir los requisitos propuestos.

La eficiencia de estos convertidores puede ser superior al 90 %, sumando la alta eficiencia del supercondensador (superior al 95%), el sistema utilizado por el vehículo eléctrico sigue siendo mucho más eficiente que los sistemas con fundamento térmico y mecánico utilizados por el vehículo de combustión habitual.

En el apartado 7 del anexo N°11, *Simulaciones y validación del algoritmo* pueden verse las pérdidas en los diferentes elementos, comprobándose que el sistema eléctrico MES-AES tiene un alto rendimiento, superior al del sistema eléctrico MES, que emplea exclusivamente baterías.

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ANEXO N°8

APLICACIÓN PRÁCTICA:

DESARROLLO DEL SISTEMA DE POTENCIA

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. SELECCIÓN DE LA BATERÍA.....	2
3. BANCO DE SUPERCONDENSADORES. DIMENSIONAMIENTO Y CÁLCULO DEL NIVEL DE TENSIÓN Y ENERGÍA NECESARIA.....	6
3.1. Frenado regenerativo. Tensión mínima de trabajo.	13
4. SELECCIÓN DE LOS SEMICONDUCTORES	14
5. RIZADO DE LA CORRIENTE Y CÁLCULO DE LA BOBINA L_s	15
6. CONDENSADOR PARA EL FILTRADO Y SOBRETENSIONES.....	17
7. MALLAS SNUBBER PARA LA PROTECCIÓN DEL IGBT.....	20
8. CÁLCULO DEL DISIPADOR.....	22
9. PROTECCIONES	27



1. INTRODUCCIÓN

En el anexo N°6, *Solución adoptada para el sistema de potencia*, se explica de forma general la arquitectura del sistema de potencia. En ese anexo se selecciona también el motor a adquirir (ni el motor ni el inversor se diseñan en este proyecto) para cumplir las prestaciones que se le exigen al vehículo. Las principales características del motor elegido se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características básicas del motor elegido

	Motor elegido
P máx.	75 kW
I nominal (380V)	135 A
I máx.	197 A

Así pues, la potencia de la aceleración estará limitada a 75 kW. Si tuviésemos que realizar una frenada de emergencia a una velocidad alta, los frenos convencionales se combinarían con el frenado regenerativo para no superar esos 75 kW en el motor.

Partiendo de este motor, vamos a comenzar a desarrollar nuestro sistema de potencia MES-AES para vehículo eléctrico. Primero seleccionaremos la batería, que deberá ser capaz de mantener la velocidad sin recurrir al supercondensador, además de garantizar la máxima autonomía posible. Posteriormente dimensionaremos el supercondensador, que deberá almacenar la energía suficiente para realizar aceleraciones y pendientes así como para absorber frenados regenerativos. Finalmente dimensionaremos el convertidor, disipador y el resto de elementos necesarios.

2. SELECCIÓN DE LA BATERÍA

Para disminuir la corriente y con ello reducir tanto las secciones de cable como los esfuerzos sobre los elementos y la propia batería, el paquete de baterías dispondrá de las células en serie necesarias para alcanzar una tensión lo suficientemente alta. Finalmente hemos elegido una batería con una tensión de 360 V.

Según se descarga la batería se reduce su tensión. Sin embargo, si gracias a nuestro sistema AES hemos reducido la corriente sobre ella, mantendrá un valor de tensión mayor al final de su capacidad (ver tensiones correspondientes a 30Ah a la derecha de la Figura 1).



Figura 1. Imagen y curva de descarga de la célula de una batería

El fabricante AESC (Automotive Energy Supply Corporation) vende un paquete de baterías que contiene 192 células (96 en serie y 2 en paralelo). Tras realizar la recarga, la tensión de la batería alcanza los 400 V máximos. Con el voltaje nominal de 3,75 V por célula tenemos 360 V de tensión de trabajo media. Si gracias al sistema AES hemos reducido la corriente a aproximadamente 1C, poco antes del final de la autonomía aún dispondremos aproximadamente de $3,5\text{V} \cdot 96 = 336\text{V}$ (ver línea discontinua en Figura 1). El paquete de baterías seleccionado puede verse en la Figura 2.



Figura 2. Paquete de baterías de 360 V. (Usado por el Nissan Leaf)

A partir de los datos disponibles (extraídos de la curva de la Figura 1), calculamos la energía total que almacena el paquete de baterías:

$$360 V_{\text{medios}} \cdot 33 \text{ Ah}_{\text{máximos}} \cdot 2 \text{ células paralelo} = 23,76 \text{ kWh} \quad (0.0)$$

Esta cifra calculada es muy semejante a los 24 kWh totales (22,48 kWh útiles) que proporciona el fabricante. Estas cifras corresponden a una autonomía de unos 135 km en condiciones de conducción normales. La autonomía dependerá del tipo de circuito, descenderá con la velocidad y el número de consumos conectados (climatizador, etc.), como podemos ver en la Tabla 2. La degradación de las baterías también disminuye la autonomía con el tiempo.



Tabla 2. Autonomía del vehículo en función de la velocidad y carga inicial (Terreno plano, ventanillas cerradas, sin calefacción ni climatizador)

Autonomía restante (en km)			
Carga inicial / Velocidad	56 km/h	97 km/h	121 km/h
100%	213	132	100
84%	187	116	87

Con el sistema AES diseñado la degradación de las baterías será menor y las aceleraciones y frenados regenerativos serán más eficientes. En total, mi estimación es que la autonomía a largo plazo podría llegar a ser un 20 % superior.

Al intercambiar energía, nuestro convertidor CC/CC elegido debe elevar la tensión del supercondensador y reducir la de la batería. Según se descarga la batería, si la tensión de las baterías desciende por debajo de la tensión máxima del supercondensador este último perdería parte de su funcionalidad. Para evitar el cruce de las tensiones de ambos elementos posteriormente fijaremos el valor máximo del banco de condensadores en sobre 300 V (siempre menor tensión que las baterías).

Para conseguir nuestros objetivos y aumentar la vida útil de las baterías, nos marcaremos como objetivo que la corriente por las baterías sea relativamente baja (60 A). Como en el paquete de baterías hay dos células en paralelo, serán 30 A los que circulen por cada una de las células (lo correspondiente a 1C en la Figura 1). Además, según la Figura 1, una corriente menor conlleva una tensión mayor durante la curva de descarga (garantizando mayor potencia).

Es probable que en situaciones infrecuentes la corriente por las baterías alcance durante unos segundos los 100 A totales. Sin embargo, este valor está muy lejano de los 200 A que se necesitaban en ausencia del AES, los cuáles desgastaban las baterías, según el estudio que hemos realizado (ver anexos N°2 y N°3).

A continuación, vamos a comprobar que estos 60 A del sistema MES utilizados a la tensión mínima en condiciones normales (336V) son suficientes para vencer los esfuerzos de rodadura y resistencia del aire para mantener la velocidad del vehículo sin requerir del sistema AES:

$$\text{Batería al 100 \%} \quad P_{\max} = 60 \text{ A} \cdot 400 \text{ V} = 24 \text{ kW} \quad (0.1)$$

$$\text{Condiciones medias} \quad P_{\text{media}} = 60 \text{ A} \cdot 360 \text{ V} = 21,6 \text{ kW} \quad (0.2)$$

$$\text{Batería al 10 \%} \quad P_{10\%} = 60 \text{ A} \cdot 336 \text{ V} = 20,16 \text{ kW} \quad (0.3)$$

**Tabla 3. Potencia necesaria para mantener la velocidad a diferentes velocidades**

Velocidad	Rodadura	Aerodinámica	Total aprox.
50 km/h	5,5 CV	2 CV	6 kW
100 km/h	5,5 CV	16 CV	16 kW

$$P_{10\%} = 20,16\text{kW} > P_{100\text{km}} = 16\text{ kW} \quad (0.4)$$

Como podemos ver en la Ecuación 0.4, durante más del 90 % de la autonomía, incluso a altas velocidades (100 km/h), el sistema MES de las baterías es suficiente para mantener la velocidad.

La batería también puede soportar pequeñas regulaciones de velocidad (aceleraciones de valor pequeño, en tiempo largos) sin necesidad del sistema AES, ya que el supercondensador estará reservado para aceleraciones y frenados importantes, o pendientes exigentes. Como vemos en la ecuación 0.4, la batería aún tiene un cierto margen para que el vehículo pueda circular a velocidades mayores a 100 km/h, o en ligera pendiente, sin que la corriente supere los 60 A ideales. Por lo tanto, la batería está correctamente dimensionada.

Como también se puede deducir de la Tabla 3, la reducción del peso para reducir la rodadura, así como el diseño aerodinámico para enfrentarse a la resistencia que ofrece el viento son factores que cobran aún más importancia en el caso de los vehículos eléctricos, ya que pueden afectar considerablemente a sus prestaciones, autonomía y vida útil de las baterías.

En el caso de que forzásemos nuestro vehículo hasta el límite de su autonomía tendríamos en la batería 240 V (según la Figura 1: 2,5 V por célula) y una potencia de $240\text{V} \cdot 60\text{A} = 14,4\text{ kW}$. Además, la tensión del supercondensador sería mayor y parte de su energía se descargaría hacia las baterías (a través del diodo superior del convertidor CC-CC, Figura 5). A partir de ese momento dejaríamos de contar con parte de la potencia de nuestro sistema AES.

En estas condiciones pesimistas, los vehículos actuales entran en modo tortuga, avanzando a una velocidad baja y más eficiente que nos permita llegar hasta el punto de recarga más cercano, en el caso de que exista. Además, la utilización del modo tortuga para limitar las prestaciones del vehículo evita la degradación del paquete de baterías en esas situaciones límite. (Como el modo tortuga no era estrictamente necesario para desarrollar el funcionamiento general del sistema MES-AES no se ha tenido en cuenta en este proyecto).



Por último, el fabricante no indica la resistencia interna de la batería. Hemos observado diferentes células, viendo que se su valor se encuentra entre 20 y 100 mΩ. Finalmente se ha estimado una resistencia de 50 mΩ para cada célula (más sus uniones con las colindantes) obteniendo un resistencia total de 2,4 Ω con todas las células en serie (96) y paralelo (2).

3. BANCO DE SUPERCONDENSADORES. DIMENSIONAMIENTO Y CACLULO DEL NIVEL DE TENSIÓN Y ENERGÍA NECESARIA

El sistema MES deberá ser capaz de aportar la potencia media consumida (mantener la velocidad), mientras que el AES deberá complementar la potencia instantánea del vehículo. En teoría, la capacidad de almacenamiento de energía del supercondensador deberá ser la integración de esa diferencia de potencia.

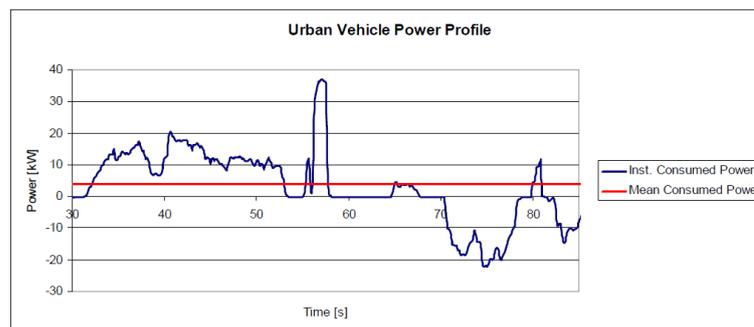


Figura 3. Potencia demandada por el vehículo eléctrico

En la práctica este cálculo es complejo, ya que la potencia media varía según el circuito (urbano, no urbano, etc.). Además, frente a pendientes especialmente prolongadas el consumo de energía del supercondensador sería alto, sin posibilidad de recuperación de energía mediante un frenado regenerativo o a partir de las baterías hasta que terminásemos el ascenso. Aquí tenemos diferentes opciones:

- A) Supercondensador barato pero de baja capacidad de almacenamiento. Su aporte energético no está siempre disponible.
- B) Supercondensador caro con una alta capacidad de almacenamiento de energía, siempre disponible.

La solución estará en un punto intermedio, un supercondensador capaz de aportar energía en la mayor parte de las ocasiones, a un coste asequible.



Debido a esto, el sistema MES deberá tener también una potencia suficiente, en el caso de que se agote el supercondensador, hasta que el esfuerzo termine y podamos volver a funcionar correctamente.

Con una masa de 1400 kg, un rendimiento del 80 % en la utilización de la energía hasta las ruedas y teniendo en cuenta el límite de 60 A establecido en las baterías (proporcionando una potencia media de 21,6 kW según la ecuación 0.2), así como otros aspectos que explicaremos más adelante obtenemos los siguientes resultados para diferentes asociaciones de supercondensadores.

Tabla 4. Comparación del sistema AES fabricado mediante diferentes asociaciones de supercondensadores. Ver anexo N°4, Supercondensadores.

Comparativa	Peso (kg)	Volumen (litros)	Coste (sin IVA)	Total de ud.
Células de 2,7 V	58,1	57,7	4.948,74 €	114
Módulos de 48 V	135,0	124,0	13.800,00 €	10
Módulos de 125 V	181,5	209,1	16.644,00 €	3

Como se puede ver en los resultados, donde el número de células o módulos ha sido optimizado y reducido al máximo, el montaje mediante células de 2,7 V sale claramente beneficiado. Esto se explica porque no hemos incluido los costes de construcción, ni aspectos y características que salen perjudicados tras el montaje y conexión de cada una de las células (por ejemplo, la resistencia interna).

De todas formas, lo lógico será implementar un banco de supercondensadores específico, a la medida exacta, y no construirlo mediante la asociación de módulos (48 V y 125 V) que se utilizan para otras aplicaciones, que resultan menos flexibles. Por ello utilizaremos las células de 2,7 V de Maxwell Technologies, modelo BCAP3000 F, cuyas características pueden verse en el anexo N°4.

Los requisitos que nos hemos planteado para obtener los resultados son los siguientes. El sistema AES deberá ser capaz de:

1. Aportar energía suficiente para una aceleración moderada en carretera abierta (40-100 km/h).

Las aceleraciones en ciudad tienen una exigencia energética menor, y los frenados regenerativos siempre pueden complementarse con los frenos convencionales.

⇒ Resultado energético sobre el sistema AES: 112 Wh (ver ecuación 1.4)



$$\Delta E_c = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) \quad (1.1)$$

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot 1400 \text{ kg} \cdot \left[\left(27,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 - \left(11,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \right] = 454741 \text{ J} = 126,3 \text{ Wh} \quad (1.2)$$

$$E_{\text{aceleración}} = \frac{\Delta E_c}{\eta} = \frac{126,3 \text{ Wh}}{0,8} = 157,8 \text{ Wh} \quad (1.3)$$

Trabajando el motor a su potencia máxima, utilizando el resultado de 1.3 y la ecuación 0.2, que indica la potencia máxima de las baterías trabajando dentro del límite de 60 A establecido; hallamos la parte de la energía que debe ser aportada por el supercondensador.

$$\Delta E_{AES} = \frac{P_{Motor} - P_{Bat}}{P_{Motor}} \cdot \Delta E_c = \frac{(75 - 21,6) \text{ kW}}{75 \text{ kW}} \cdot 157,8 \text{ Wh} = 112 \text{ Wh} \quad (1.4)$$

2. Almacenar energía suficiente como para superar una pendiente abrupta (40 m de altura total). Si nos quedásemos sin la potencia del sistema AES a medio camino las baterías sufrirían las consecuencias, o bien se reducirían gravemente las prestaciones, pudiéndonos impedir superar el obstáculo.

De todas formas, dadas sus prestaciones y su limitada autonomía, el vehículo eléctrico no sería el más adecuado para actividades más indicadas para vehículos todo terreno.

⇒ Resultado energético sobre el sistema AES: 136 Wh (ver ecuación 2.3).

En este caso la velocidad se mantiene constante durante el ascenso, por lo que la energía del sistema se emplea en aumentar la energía potencial.

$$\Delta E_p = mgh = 1400 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 40 \text{ m} = 549,4 \text{ kJ} = 152,6 \text{ Wh} \quad (2.1)$$

$$E_{\text{ascenso}} = \frac{\Delta E_p}{\eta} = \frac{152,6 \text{ Wh}}{0,8} = 190,7 \text{ Wh} \quad (2.2)$$

Si la pendiente es abrupta baterías, supercondensadores y motor trabajarán al máximo de su capacidad. Usando nuevamente la ecuación 0.2 y la 2.2:

$$\Delta E_{AES} = \frac{P_{Motor} - P_{Bat}}{P_{Motor}} \cdot \Delta E_c = \frac{(75 - 21,6) \text{ kW}}{75 \text{ kW}} \cdot 190,7 \text{ Wh} = 136 \text{ Wh} \quad (2.3)$$



3. Almacenar energía suficiente como para afrontar una pendiente prolongada, manteniendo una velocidad de 50 km/h y sin la posibilidad de recuperar energía mediante un frenado regenerativo.

Por ejemplo, una pendiente de 100 metros de altura con un 12° de inclinación (tendría una longitud total de 830 m, según la ecuación 3.2).

⇒ Resultado energético sobre el sistema AES: 120,3 Wh (ver ecuación 3.7)

$$\Delta E_p = mgh = 1400 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 100 \text{ m} = 1\,373,4 \text{ kJ} = 381 \text{ Wh} \quad (3.1)$$

En este caso el cálculo será algo diferente al del punto 2. Primero calculamos la potencia necesaria para el ascenso a la velocidad dada (50 km/h=13,9m/s).

$$L_{\text{pendiente}} = \frac{h}{\text{inclinación}} = \frac{100\text{m}}{0,12} = 833\text{m} \quad (3.2)$$

$$t_{\text{ascenso}} = \frac{L_{\text{pendiente}}}{v} = \frac{833 \text{ m}}{13,9 \text{ m/s}} = 60 \text{ s} \quad (3.3)$$

$$P_{\text{ascenso}} = \frac{\Delta E_p}{t_{\text{ascenso}}} = \frac{1\,373,4 \text{ kJ}}{60 \text{ s}} = 22,9 \text{ kW} \quad (3.4)$$

Volvemos a la Tabla 3 y extraemos la potencia necesaria para mantener la velocidad.

$$P_{\text{total}} = P_{\text{mantener velocidad}} + P_{\text{ascenso}} = 6 + 22,89 = 28,89 \text{ kW} \quad (3.5)$$

Usando la ecuación 0.2 y 3.5 calculamos el porcentaje de la energía que le corresponde al supercondensador.

$$\frac{P_{\text{total}} - P_{\text{Bat}}}{P_{\text{total}}} \cdot 100 = \frac{(28,9 - 21,6) \text{ kW}}{28,9 \text{ kW}} \cdot 100 = 25,3 \% \quad (3.6)$$

Finalmente hallamos la energía que debe almacenar el supercondensador para realizar el esfuerzo:

$$\Delta E_{\text{AES}} = \frac{\Delta E_p}{\eta} \cdot 0,253 = \frac{381 \text{ Wh}}{0,8} \cdot 0,253 = 120,3 \text{ Wh} \quad (3.7)$$



También podríamos pensar en otros supuestos que resultan ser alguna combinación de las anteriores. Por ejemplo deberíamos ser capaces de estacionar el vehículo en una cuesta y después ser capaces de arrancarlo, acelerarlo (0-50 km/h) a la vez que realizamos un corto ascenso (20 m de altura). \Rightarrow Total: 101,29 Wh.

Al final, el parámetro más restrictivo no ha tenido relación con la capacidad energética, ya que hemos tenido que aumentar la tensión total para que la corriente bajase de la máxima que admitían las células del supercondensador (hemos ido probando diferentes montaje en serie y paralelo, representando el que menos elementos empleaba en la Tabla 4).

Tras varias pruebas la distribución más óptima resulto ser el montaje en serie. No ha sido necesario colocar células en paralelo y recurrir a un montaje mixto para poder cumplir los requisitos energéticos. Para compensar los aspectos que se verían perjudicados tras el montaje en serie hemos sobredimensionado un 25 % el volumen, un 40 % el peso y un 33 % la resistencia total (estimando la resistencia de cables y uniones, etc.).

Finalmente, para obtener unas prestaciones más holgadas y aumentar la potencia del supercondensador se ha aumentado el número de células hasta 114 células en serie (frente a las 95 obtenidas en los resultados reflejados en la Tabla 4). El banco de supercondensadores final tiene las siguientes características:

Tabla 5. Características finales del banco de supercondensadores

Banco de supercondensadores	
Células en serie (2,7 V)	114
Células en paralelo (210 A)	1
Tensión total (V)	307,8
Capacidad (F)	26,3
Energía total (Wh)	346,3
Peso total (kg)	81,4
Volumen (litros)	72,1
ESR (m Ω)	44,5

Las células del banco de supercondensadores aguantan hasta 210 A en régimen estacionario, los componentes del semiconductor soportarán una mayor corriente para no limitarlo.



Otro de los problemas a resolver en el dimensionamiento y en el posterior sistema de control es que, según se usa la energía del supercondensador y se va descargando, disminuye su tensión y por tanto se reduce la potencia asumible por el sistema AES.

Para garantizar las prestaciones del vehículo, hemos tratado de alcanzar los requisitos energéticos anteriores (1, 2 y 3) considerando que el supercondensador solo puede descargarse desde el máximo hasta el 70% de la tensión nominal. Esto quiere decir que la tensión de trabajo óptima durante aceleraciones y pendientes va desde el máximo de 307,8V hasta los 215V.

Considerar solo un 30 % del rango de tensión como el rango útil puede parecer un porcentaje demasiado bajo. Sin embargo, según la Ecuación 4.2, supone aprovechar más de un 50 % de la energía (177 Wh útiles de 346 Wh totales) con una potencia del supercondensador cercana a la máxima del motor. Además, el resto de energía almacenada también puede usarse, aunque con una potencia algo menor.

$$\Delta E = \frac{1}{2} C (V_1^2 - V_2^2) \quad (4.1)$$

$$\Delta E(\%) = \frac{(V_{\text{máx}}^2 - (0,7V_{\text{máx}})^2)}{V_{\text{máx}}^2} \cdot 100 = 51 \% \quad (4.2)$$

En la Tabla 6 se pueden ver más características del sistema AES diseñado.

Tabla 6. Características y prestaciones del AES. (En funcionamiento normal)

Características del Sistema AES	
Tensión máxima (V)	307,8
Tensión mínima recomendable final aceleración (70%)	215,5
I máxima (A)	210
P máx. del banco (kW)	64,6
P mín. del banco (kW) – 50 %	45,2
Energía útil para la aceleración (Wh)	176,6
Energía total (Wh)	346,3
Energía recuperable (Wh)	242,4

La suma de las potencias nominales del sistema AES y MES deberá ser algo mayor que la potencia del motor. De esta forma el vehículo podrá proporcionar la potencia máxima del motor durante un mayor tiempo, sin tener que sobrepasar el límite de corriente en las baterías. Así, el límite de corriente podrá respetarse incluso cuando



las baterías y supercondensadores no están totalmente cargados y a su potencia máxima. De esta forma garantizamos una mayor vida útil para las costosas baterías de litio.

Con la tensión máxima se pueden extraer 64,6 kW (ver Tabla 6) del supercondensador, de tal forma que inicialmente no trabajará al máximo para aportar la máxima potencia al motor (75 kW), contando con los 21,6 kW (ecuación 0.2) nominales de la batería, cuando trabaja en el límite de 60 A.

Cuando la tensión del supercondensador llega al valor final del rango considerado como útil, la potencia que podemos obtener se reduce a 45 kW que sumada al esfuerzo ideal al que vamos a someter a nuestras baterías (60 A) da un total de $45+21,6=66,6$ kW. En una aceleración o pendiente demasiado larga, en los momentos finales no se alcanzarían los 75 kW.

Aquí tenemos dos opciones. Una es forzar al motor a funcionar por debajo de su capacidad. Sin embargo, se ha considerado que la pérdida de potencia a mitad de un adelantamiento o situación similar afectaría considerablemente a la conducción e incluso a la seguridad. La otra opción es permitir que la corriente sobre las baterías sobrepase el límite ideal (60 A) y aumente ligeramente hasta unos 100 A. Se supone que ese esfuerzo solo va a prolongarse unos instantes más, así que nos hemos decantado por esta opción. Las baterías siguen manteniéndose lejos de los 200 A que deben soportar cuando funcionan en solitario, por lo que la mejoría de la vida útil se mantiene en su mayor parte.

En el montaje final, teniendo el supercondensador inicialmente cargado, para agotar su capacidad energética útil de 176,6 Wh (en la que entrega mayor potencia) y alcanzar la tensión mínima recomendable (215,5 V) se debería someterlo a esfuerzos importantes, superiores a:

- Aceleración hasta la velocidad máxima permitida en autovía española (de 40 a 120 km/h). Total: 171 Wh.
- Afrontar una pendiente abrupta de 50 m. Total: 169 Wh.
- Circular a 50 km/h por una longitud de 1,2 km con una pendiente del 12 %. Total: 168 Wh.

Como podemos ver por estas prestaciones, rara vez el supercondensador alcanzará el valor de tensión de 215,5 V (o peor), sobre todo si somos conscientes de las



limitaciones de nuestro vehículo y no lo sometemos a esfuerzos innecesarios. Pese a la pérdida de potencia al final de largas aceleraciones, el sistema AES aún mantendría la mitad de la energía (346,3 Wh totales) y un cierto rango de utilidad media con potencias superiores a 35 kW, permitiendo terminar la aceleración sin que las baterías se vean sensiblemente afectadas.

En el caso de una aceleración o pendiente extremadamente grande el supercondensador se agotaría eventualmente. Sin embargo, estamos situándonos en el peor caso, ya que esas son situaciones específicas y muy esporádicas, y no sale rentable sobredimensionar el supercondensador para cubrir ese reducido número de ocasiones.

3.1. Frenado regenerativo. Tensión mínima de trabajo.

Por otro lado, cuando circulamos a altas velocidad, el supercondensador debe descargarse y estar preparado para aprovechar el frenado regenerativo. Sin embargo, no lo descargaremos por completo, ya que con un valor de tensión nula (0 V) el supercondensador se vería como un cortocircuito desde el lado de las baterías. Es decir, si la tensión del supercondensador (V_{SC}) es muy baja, su corriente (I_{SC}) será muy alta, según la Ecuación 4.3.

$$I_{SC} = I_{AES} \cdot \left(\frac{V_{Bat}}{V_{SC}} \right) \quad \downarrow \downarrow V_{SC} \Rightarrow I_{SC} \uparrow \uparrow \quad (4.3)$$

Los fabricantes recomiendan trabajar hasta un tercio de la tensión nominal, lo que supone aprovechar un 90 % de la energía del supercondensador, siguiendo la Ecuación 4.4.

$$\Delta E(\%) = \frac{(V_{m\acute{a}x}^2 - (1/3 V_{m\acute{a}x})^2)}{V_{m\acute{a}x}^2} \cdot 100 = 91 \% \quad (4.4)$$

Nosotros, para evitar que se produzcan sobrecorrientes y cortocircuitos disminuirémos la tensión del supercondensador hasta un mínimo de 170 V, lo que según la Ecuación 4.1 corresponden a un 30 % de su capacidad energética. Aun circulando a velocidades de 120 km/h o más, el supercondensador no bajará nunca de ese 30 %. Por lo tanto, ante un frenado regenerativo como máximo se podrá regenerar el restante 70 % de la energía (unos 242,4 Wh, visibles en la Tabla 6). Este valor debería ser más que suficiente para recuperar la energía de varios frenados consecutivos que podrían darse en un descenso mediano-largo.



En el caso de que un frenado regenerativo provocase una sobretensión (hecho que se ha impedido mediante el sistema de control) las células del supercondensador pueden aguantar hasta 2,85 V, que corresponden a 325 V en total. Este valor sigue siendo inferior a la tensión mínima de trabajo de la batería (336 V) en condiciones normales.

Así pues, el valor de tensión de la batería no cae por debajo de la tensión del supercondensador hasta los últimos momentos (cuando queda tan solo el último 5 % de la autonomía del vehículo). Por lo tanto, el sistema AES sirve de apoyo a la batería durante casi todo momento.

4. SELECCIÓN DE LOS SEMICONDUCTORES

El elemento semiconductor que mejor se adapta a nuestras necesidades es un IGBT, ya que puede trabajar a frecuencias moderadamente altas con pocas pérdidas. Los transistores MOS pueden funcionar a mayores frecuencias, pero producen mayores pérdidas en conducción.

Las corrientes máximas que se alcanzan se producen cuando el motor trabaja a su potencia máxima (75 kW), y tienen un valor máximo inferior a 200 A. Por otro lado, para intercambiar energía con el supercondensador la corriente podrá alcanzar hasta los 210 A máximos de las células del banco.

Por otra parte, el IGBT en corte deberá ser capaz de soportar tensiones superiores a 400 V, ya que además de la tensión máxima de las baterías (400 V) se producen también sobretensiones debido a las inductancias parásitas del cableado y los altos valores de di/dt .

Finalmente se seleccionó el modelo SEMiX302GB066HDs, el cuál soporta corrientes en torno a 300 A (según la temperatura) y una tensión de 600 V en corte y cuya arquitectura puede verse en la Figura 4:

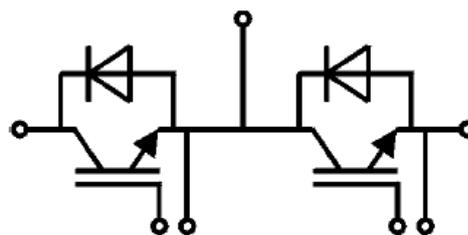


Figura 4. Arquitectura del dispositivo semiconductor elegido



5. RIZADO DE LA CORRIENTE Y CÁLCULO DE LA BOBINA L_S

La bobina sirve como elemento almacenador de energía, formando parte de nuestro convertidor CC-CC. Del valor de la bobina dependerá el rizado de la corriente por el supercondensador. Ya que este funciona con corriente continua, nos interesa eliminar las componentes alternas que componen el rizado, ya que no son útiles y calientan los elementos, ocasionando pérdidas y disminuyendo el rendimiento.

Con el siguiente circuito básico, al cual iremos añadiendo los elementos necesarios, realizamos una simulación.

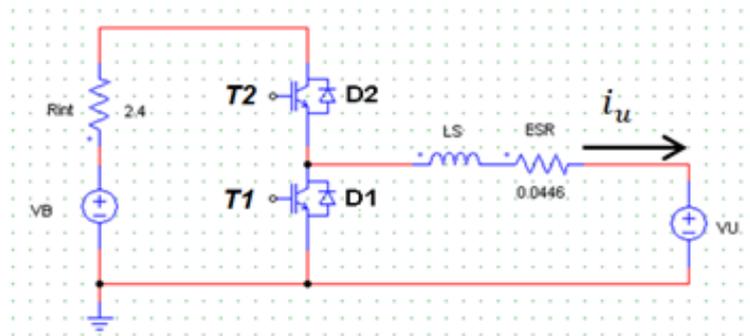


Figura 5. Circuito básico de nuestro convertidor CC-CC elevador-reductor

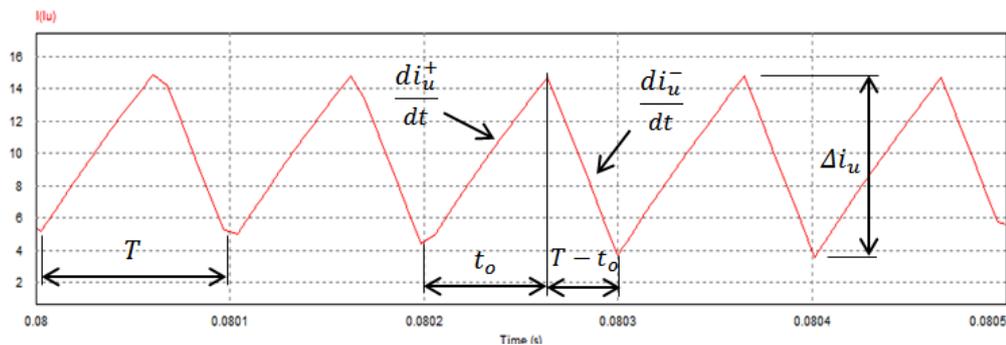


Figura 6. Corriente por el supercondensador I_U . (Ejemplo realizado con un valor de L_S bajo)

Para calcular el valor necesario de la bobina consideraremos despreciables el valor de la resistencia interna de la batería y ESR del supercondensador:

$$\frac{di_u^+}{dt} = \frac{V_B - V_U}{L} = \frac{\Delta i_u}{t_o} \quad (5.1)$$

$$\frac{di_u^-}{dt} = -\frac{V_U}{L} = -\frac{\Delta i_u}{T - t_o} \quad (5.2)$$



La relación entre el tiempo de encendido (t_o) y el periodo (T) viene dado por el ciclo de trabajo:

$$\delta = \frac{t_o}{T} \Rightarrow t_o = \delta T \quad (5.3)$$

Si restamos la Ecuación 5.2 a la 5.1:

$$\frac{V_B - V_U}{L} + \frac{V_U}{L} = \frac{\Delta i_u}{t_o} + \frac{\Delta i_u}{T - t_o} \quad (5.4)$$

Simplificando y reduciendo a denominador común la Ecuación 5.4.

$$\frac{V_B}{L} = \Delta i_u \left(\frac{(T - t_o)}{t_o(T - t_o)} + \frac{t_o}{t_o(T - t_o)} \right) = \Delta i_u \left(\frac{T}{t_o(T - t_o)} \right) \quad (5.5)$$

Introducimos en 5.5 la relación dada por el ciclo de trabajo en la Ecuación 5.3.

$$\frac{V_B}{L} = \Delta i_u \left(\frac{T}{\delta T(T - \delta T)} \right) = \Delta i_u \left(\frac{1}{\delta T(1 - \delta)} \right) \quad (5.6)$$

Sustituyendo en 5.6 con $T = 1/f$ despejamos el rizado Δi_u , que tiene la siguiente expresión final:

$$\Delta i_u = \frac{V_B}{Lf} \delta(1 - \delta) \quad (5.7)$$

Como vemos, el rizado de la corriente depende de δ . En nuestro sistema, el ciclo de trabajo δ variará según cuánto haya que elevar o reducir la tensión, según la diferencia entre el valor de la corriente actual y de referencia, etc. Para saber el peor caso, derivamos en función de δ la expresión 5.7 y la igualamos a cero.

$$\frac{di_u}{d\delta} = \frac{V_B}{Lf} - 2\delta \frac{V_B}{Lf} = 0 \quad \text{Resultado} \Rightarrow \delta = 0,5 \quad (5.8)$$

Con la solución obtenida en la Ecuación 5.8 regresamos a la expresión del rizado en 5.7 y sustituimos con el valor $\delta = 0,5$, hallando la expresión correspondiente al rizado máximo:

$$\Delta i_u = \frac{V_B}{Lf} 0,5(1 - 0,5) = \frac{V_B}{4Lf} \quad (5.9)$$

Con la potencia máxima del motor la corriente tiene el valor de 197 A (ver Tabla 1). Como parámetro de diseño permitiremos un rizado del 3 % de ese valor.



$$197 \text{ A} \cdot 0,03 = 5,91 \approx 6 \text{ A} \quad (5.10)$$

A continuación tenemos que definir la frecuencia de trabajo. Cuánto más elevemos la frecuencia menor será el valor de la bobina (reduciendo su peso y coste). Sin embargo, también serán mayores las pérdidas por conmutación de los semiconductores, que exigirán un mejor disipador. Finalmente hemos elegido una frecuencia de 10.000 Hz.

Con el rizado máximo permitido de 6 A como resultado de la Ecuación 5.10 y la frecuencia de trabajo de 10 kHz calculamos la bobina. El peor caso para el cálculo se da cuando la batería se encuentra con carga máxima (400 V).

$$L = \frac{V_B}{4\Delta i_u f} = \frac{400}{4 \cdot 6 \cdot 10000} = 1,67 \text{ mH} \quad (5.11)$$

El rizado máximo es el mismo tanto para la operación de reducción como de elevación de tensión. Introducimos estos valores en nuestra simulación en PSIM y comprobamos el resultado.

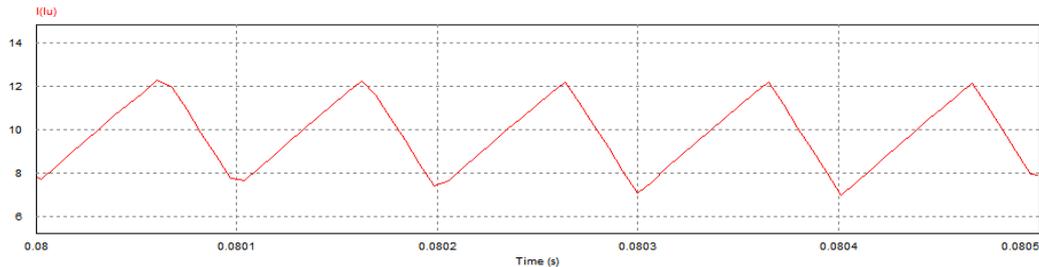


Figura 7. Corriente por el supercondensador I_U . ($L_s=1,67 \text{ mH}$)

Como podemos ver el rizado de la corriente en la Figura 7 se ha reducido frente al de la Figura 6 y es inferior al máximo que habíamos fijado (6 A).

6. CONDENSADOR PARA EL FILTRADO Y SOBRETENSIONES

Las inductancias parásitas distribuidas por todo el cableado (agrupadas en L_{cable1} y L_{cable2} en la Figura 8) pueden causar sobretensiones cuando se abren y cierran los semiconductores. Esto es debido a los grandes valores de di/dt , ya que las variaciones de corriente son altas y el tiempo en el que se producen es breve debido a la elevada frecuencia de trabajo (10 kHz \Rightarrow 0,1 ms por ciclo). El valor de las sobretensiones seguirá la siguiente ecuación básica:



$$V_L = L \frac{d_i}{d_t} \quad (6.1)$$

Para comprobar los resultados hemos introducido 5 μH como valor de las inductancias parásitas presentes en los cables. El peor caso se dará cuando el motor trabaje a máxima potencia exigiendo 197 A al sistema MES-AES.

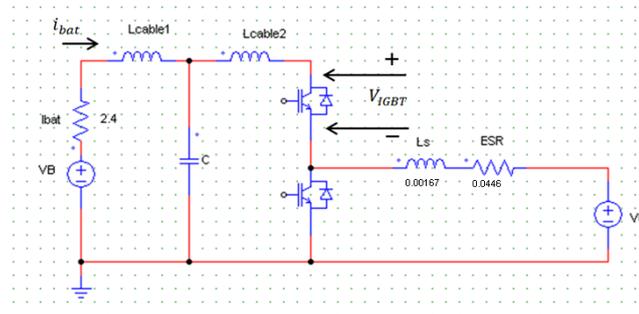


Figura 8. Circuito que incluye las inductancias parásitas de los cables

Para evitar este problema es necesario introducir un condensador C, como puede verse en la Figura 8. A su vez este condensador actúa de filtro para la corriente de la batería. Simulamos como es la corriente sobre la batería antes de colocarlo:

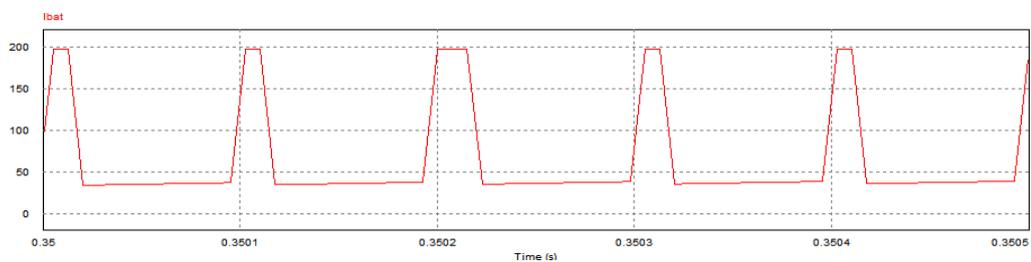


Figura 9.1. Corriente por la batería antes de la implementación del condensador C

En la Figura 9.1 vemos que sin el condensador C de la Figura 8 la intensidad es muy diferente de una corriente continua. Los cambios bruscos de corriente producen las sobretensiones explicadas, siguiendo la ecuación 6.1. Además el rizado sobre la batería es muy alto. Sin este condensador no podemos limitar la corriente a 60 A, ya que cuando el IGBT superior no conduce la batería debe asumir toda la corriente del motor. Por lo tanto este condensador es vital para el correcto funcionamiento del sistema y alargar la vida útil de las baterías.

La función de este condensador es reducir el rizado por la batería y Lcable1. Por lo tanto, se deberá colocar (físicamente) lo más cerca posible de los semiconductores del módulo IGBT para reducir Lcable2, ya que la corriente que atraviesa esos



segundos cables sigue sin suavizar. Los conductores deberán estar especialmente dimensionados para que L_{cable2} sea pequeña.

El semiconductor elegido soporta valores de hasta 600 V. Para el cálculo, vamos a estimar que la tensión en los bornes del condensador llega hasta 450 V (algo más del máximo de las baterías). Como se deduce en la Ecuación 6.2, dejaremos un margen de 150 V para las sobretensiones que siguen produciéndose en L_{cable2} .

$$V_C + V_{L_{cable2}} = V_{IGBT} \Rightarrow 450 + V_{L_{cable2}} = 600 \Rightarrow V_{L_{cable2}} = 150 \text{ V} \quad (6.2)$$

Para hallar el valor del condensador, primero hallaremos la energía que debe absorber, que coincide con la energía almacenada en la inductancia L_{cable1} .

$$E = \frac{1}{2} L_{cable1} \cdot I^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \mu\text{H} \cdot 197^2 = 0,097 \text{ J} \quad (6.3)$$

En el peor caso, la tensión en ese supercondensador variará entre los 450 V máximos que acabamos de fijar y un mínimo de 400 V (cuando la tensión de las baterías es máxima). Con la energía almacenada calculada en 6.3 hallamos la capacidad necesaria para el caso más estricto:

$$C = \frac{2\Delta E}{(V_1^2 - V_2^2)} = \frac{2 \cdot 0,097}{(450^2 - 400^2)} = 4,56 \mu\text{F} \quad (6.4)$$

Sin embargo, aunque el condensador calculado en 6.4 tiene la capacidad suficiente como para reducir las sobretensiones debidas a L_{cable1} , es insuficiente para reducir el rizado sobre la corriente de la batería.

Ya que este condensador no es un elemento especialmente costoso o pesado, pero puede ser fundamental para conseguir nuestro objetivo de alargar la vida de las baterías, las cuáles sí tienen un coste alto, lo hemos dimensionado hasta 2400 μF (el valor necesario se ha obtenido por ensayo y error a partir de la simulación). El condensador elegido ha sido un Cornell Dubiller de 2400 μF y tensión máxima de 500 V (superior a los 450 V máximos que le exigimos en la Ecuación 6.2).

Comprobamos el resultado y vemos como el rizado de la Figura 9.2 es mucho menor al de la Figura 9.1. El rizado cumple el criterio anterior del 3 % respecto a la corriente máxima del motor (Ecuación 5.10), por lo que apenas provocará ningún efecto negativo en la batería.

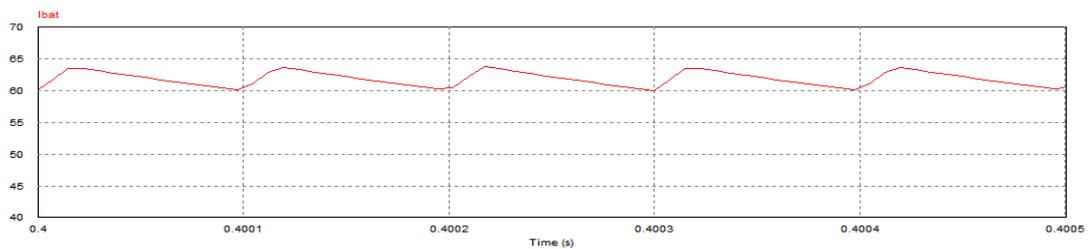


Figura 9.2. Corriente por la batería tras la implementación del condensador de 2400 μF

7. MALLAS SNUBBER PARA LA PROTECCIÓN DEL IGBT

Con el condensador anterior se han reducido las sobretensiones debido a las inductancias parásitas L_{cable1} , así como reducido el rizado sobre la batería. Sin embargo y según la ecuación 6.1, aún quedan las sobretensiones producidas debido a L_{cable2} . Si estas sobretensiones provocan que al bloquear el IGBT se supere su valor de V_{CES} de 600 V puede producirse el efecto avalancha, destruyendo nuestros semiconductores.

Para evitar estas sobretensiones transitorias producidas por una alta di/dt en L_{cable2} introduciremos mallas snubber para la protección del IGBT. El objetivo de este tipo de protecciones es absorber y amortiguar los transitorios de tensión, protegiendo los componentes, tal y como se puede ver en la Figura 10.

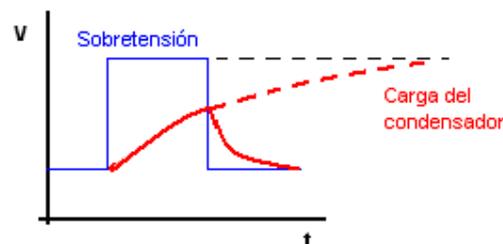


Figura 10. Protección de sobretensiones. Funcionamiento de una malla Snubber

En la Figura 11 podemos ver diferentes configuraciones de mallas snubber. El montaje A es el más simple y barato, tiene pocas pérdidas pero para altas potencias el condensador puede oscilar. Para evitar esto el montaje A se combina con un diodo para bloquear las oscilaciones y una resistencia para amortiguarlas, formando el montaje B.

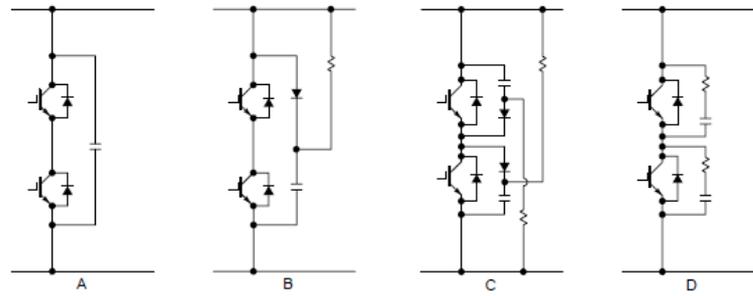


Figura 11. Tipos de mallas snubber para la protección de IGBTs

El montaje C se usa cuando el montaje B sigue resultando insuficiente para controlar los transitorios de tensión. El inconveniente es que emplea un mayor número de componentes. Por último el montaje D produce mayores pérdidas en alta frecuencia, por lo que no lo hemos considerado adecuado.

Ya que la inductancia parásita supuesta en L_{cable2} tenía un valor de $5 \mu\text{H}$ y que la corriente puede llegar a superar hasta los 300 A puntualmente (vistas simulaciones posteriores) para asegurar la protección de los IGBT emplearemos el montaje C, ya que el montaje A y B podrían resultar insuficientes.

El montaje C se construye con dos de los mismos módulos que emplea el montaje B, conectándolos de forma diferente. Los montajes tipo B en venta incluyen el diodo y el condensador, dejando al diseñador la elección del valor de la resistencia externa, tal como se puede ver en la Figura 12.

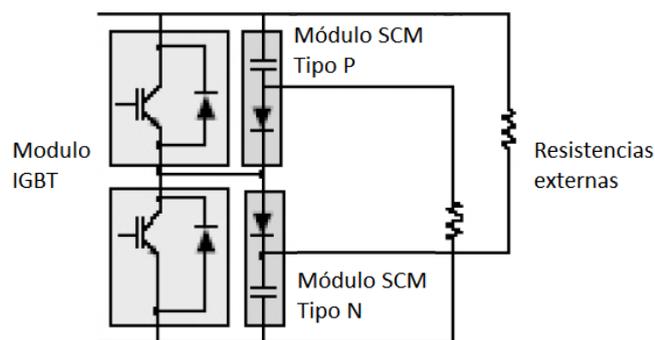


Figura 12. Malla de protección snubber tipo B

Usaremos dos módulos SCM205K122H1N29-F (tipo P y tipo N). El fabricante recomienda una constante de tiempo RC de aproximadamente un tercio del periodo de conmutación. El modelo elegido tiene un condensador de $2 \mu\text{F}$. Calculamos el valor necesario para la resistencia externa:



$$\frac{1}{3f} = \frac{1}{3 \cdot 10000 \text{ Hz}} = 33,3 \mu\text{s} = RC \quad (7.1)$$

$$R = \frac{33,3 \mu\text{s}}{2 \mu\text{F}} = 16,7 \Omega \quad (7.2)$$

Con el resultado de la Ecuación 7.2 buscamos entre los valores estándar de las resistencias eligiendo una de 15Ω . Con un 10-20 % de tolerancia es suficiente, ya que no es un factor determinante.

$$\tau_F = RC = 15 \Omega \cdot 2 \mu\text{F} = 30 \mu\text{s} \quad (7.3)$$

Como podemos ver los resultados de 7.1 y 7.3 son similares.

8. CÁLCULO DEL DISIPADOR

El sistema AES está planteado para funcionar de forma intermitente, ya que ayuda a realizar aceleraciones o absorber los frenados durante un tiempo breve (no mucho más de 10 segundos), pudiendo estar sin uso durante tiempos prolongados (1 minuto o más), por ejemplo mientras se transita una recta en un tramo llano.

Sin embargo durante esos breves periodos en los que el sistema AES trabaja se van a producir pérdidas en los semiconductores. Si esta energía no se disipa la temperatura de los elementos irá aumentando, pudiendo llevarlos a su destrucción.

Además de las pérdidas en conducción, en este caso también tendremos que contabilizar las pérdidas por conmutación, que no podemos despreciar ya que trabajamos a frecuencias altas de 10 kHz. Las pérdidas en corte sí podemos considerarlas despreciables.

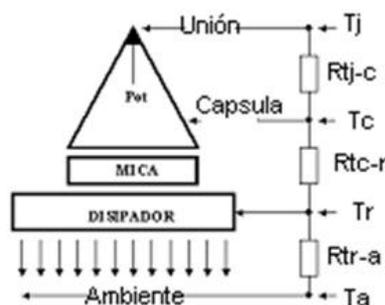


Figura 13. Dibujo explicativo de las resistencias térmicas a considerar



Como se puede ver en la Figura 13, para el cálculo deberemos considerar la resistencia térmica entre las uniones y la caja (R_{tj-c}), la resistencia entre la caja y el radiador (R_{tc-r}) y la resistencia entre el radiador y el ambiente (R_{tr-a}).

Ya que la corriente del convertidor CC/CC solo funciona en un sentido a la vez (aceleramos o frenamos, pero no ambos de forma simultánea), uno de los diodos y uno de los IGBT no realizarán ningún esfuerzo eléctrico. Por lo tanto, el circuito térmico solo dispondrá de un diodo y un IGBT, como vemos en la Figura 14. (No dispone de 2 diodos y 2 IGBT como podría deducirse por ejemplo de la Figura 12).

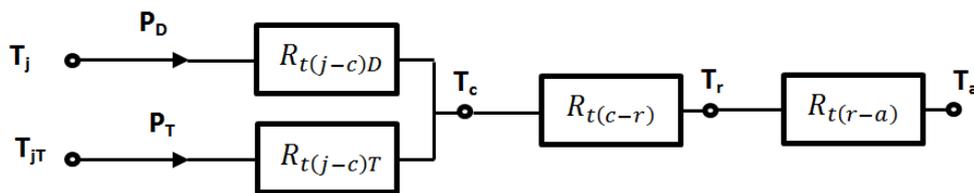


Figura 14. Circuito térmico equivalente

Para saber la potencia media que debemos disipar hemos realizado una simulación. Para ello se ha puesto al sistema en unas condiciones medianamente exigentes, correspondientes a realizar una aceleración 40-100 km/h en 7 segundos.

Los datos concretos de la simulación corresponden a los del apartado 2.1 del anexo N°11, *Simulaciones y validación del algoritmo*. En esta simulación el vehículo acelera durante los 7 primeros segundos, posteriormente ajusta el valor del supercondensador hasta los 16 segundos y durante el resto de la simulación (hasta los 20 segundos) el sistema AES permanece en espera, preparado para un futuro frenado (ver en la Figura 15.2).

En este caso el sistema funciona en modo elevador, extrayendo energía del supercondensador en todo momento, por lo que los esfuerzos se producen sobre el IGBT inferior (T1) y el diodo superior (D2), ver Figura 5. Los resultados obtenidos se representan en la Tabla 7:

Tabla 7. Intensidad media y eficaz. Valores obtenidos de la simulación

Operación de elevación	I media (A)	I eficaz (A)
Diodo (D2)	88,7	127,9
IGBT (T1)	58	103,8

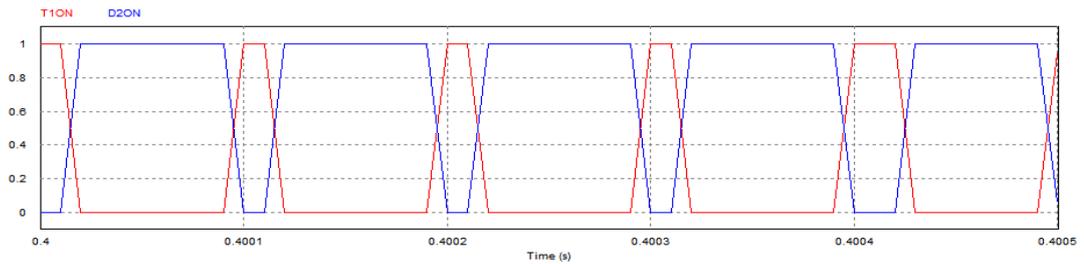


Figura 15.1. Ciclos de conducción de T1 (IGBT inferior) y D2 (diodo superior) en la Figura 5.

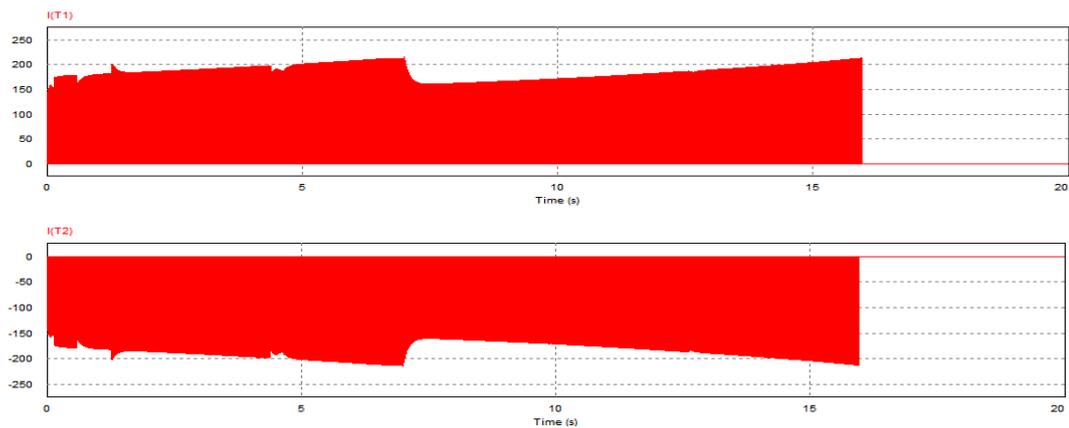


Figura 15.2. Representación de las corrientes por el IGBT I_{T1} y diodo $I_{D2} = -I_{T2}$

Calculamos las pérdidas por conducción del diodo y el IGBT, según las siguientes ecuaciones:

$$P_D = U_o \cdot I_m + p_d I_{ef}^2 \quad (8.1)$$

$$P_{IGBT} = R_{sat} \cdot I_{ef}^2 \quad (8.2)$$

Para hallar los valores necesarios para el cálculo buscamos en los parámetros y gráficas del fabricante. Estos datos dependen en ocasiones de la corriente y la temperatura de funcionamiento. La tensión umbral U_o del diodo son 0,8 V. Para la resistencia dinámica p_d del diodo tomamos un valor de 1,8 m Ω y para la resistencia R_{sat} del IGBT tomamos el dato de 2,8 m Ω . Usando las ecuaciones 8.1 y 8.2:

$$P_{\text{Conducción Diodo}} = 0,8 \text{ V} \cdot 88,7 \text{ A} + 1,8 \text{ m}\Omega \cdot (127,9\text{A})^2 = 100,4 \text{ W} \quad (8.3)$$

$$P_{\text{Conducción IGBT}} = 2,8 \text{ m}\Omega \cdot (103,8\text{A})^2 = 30,2 \text{ W} \quad (8.4)$$

Para calcular las pérdidas por conmutación usaremos los datos proporcionados por el fabricante utilizando la siguiente expresión:



$$P_{Conmutación} = (E_{on} + E_{off}) \cdot f \quad (8.5)$$

Para el IGBT elegido a 200 A y $T_j=150^\circ\text{C}$ tenemos que $E_{on} = 8 \text{ mJ}$ y $E_{off} = 9 \text{ mJ}$. Trabajando a 10 kHz obtenemos el siguiente resultado:

$$P_{Conmutación IGBT} = (8 + 9) \text{ mJ} \cdot 10.000 \text{ Hz} = 170 \text{ W} \quad (8.6)$$

También podemos usar la aproximación de la ecuación 8.7, obteniendo un resultado relativamente semejante entre las ecuación 8.6 y 8.8.

$$P_{Conmutación} = \frac{V_{m\acute{a}x} I_{m\acute{a}x}}{6} (t_{on} + t_{off}) f \quad (8.7)$$

$$P_{Conmutación IGBT} = \frac{400\text{V} \cdot 200\text{A}}{6} (110 + 820) \text{ ns} \cdot 10\text{kHz} = 124 \text{ W} \quad (8.8)$$

Para continuar el cálculo tomaremos el valor mayor de la ecuación 8.6. Calculamos también las pérdidas por conmutación el diodo. Con 200 A y $T_j=150^\circ\text{C}$ la pérdida de energía en la conmutación del diodo es de $E_{rr} = 6 \text{ mJ}$.

$$P_{Conmutación Diodo} = E_{rr} \cdot f = 6 \text{ mJ} \cdot 10 \text{ kHz} = 60 \text{ W} \quad (8.9)$$

Como podemos ver, las pérdidas por conmutación tienen valores considerables. Por lo tanto, no podemos despreciarlas. Sí podemos despreciar las pérdidas en corte. La potencia que debemos disipar en cada uno de los elementos y en todo el módulo es la suma de las anteriores (Ecuaciones 8.3, 8.4, 8.6 y 8.9).

$$P_{Total Diodo} = 100,4 + 60 = 160,4 \text{ W} \quad (8.10)$$

$$P_{Total IGBT} = 30,2 + 170 = 200,2 \text{ W} \quad (8.11)$$

$$P_{Total} = 160,4 + 200,2 = 360,6 \text{ W} \quad (8.12)$$

El análisis del rendimiento y el resto de pérdidas (en resistencias interna de la batería, bobinado, etc.) se realiza en el apartado 7 del anexo N°11, *Simulaciones y validación del algoritmo*. Revisando la hoja de características, la temperatura máxima de la unión es de 175°C . Para aumentar la vida útil utilizaremos un coeficiente de seguridad de 0,75.



$$175^{\circ}\text{C} \cdot 0,75 = 131,25^{\circ}\text{C} \quad (8.13)$$

Por lo tanto, la temperatura de la unión no debería ser superior a 131°C . Despreciando la resistencia térmica entre la caja y el radiador $R_{t(c-r)}$ las ecuaciones térmicas que definen las dos mallas de la Figura 14 son las siguientes:

$$T_{j\text{Diodo}} = T_{\text{amb}} + R_{t(jD-c)}P_{\text{Diodo}} + R_{t(r-a)_1} \cdot (P_{\text{IGBT}} + P_{\text{Diodo}}) \quad (8.14)$$

$$T_{j\text{IGBT}} = T_{\text{amb}} + R_{t(jT-c)}P_{\text{IGBT}} + R_{t(r-a)_2} \cdot (P_{\text{IGBT}} + P_{\text{Diodo}}) \quad (8.15)$$

Ya que el convertidor trabaja en el interior del vehículo hemos supuesto una temperatura ambiente alta, de 50°C . Los valores de resistencia térmica de los elementos son $R_{t(jT-c)} = 0,16 \text{ K/W}$ y $R_{t(jD-c)} = 0,19 \text{ K/W}$. Con todos los datos anteriores despejamos el valor necesario de $R_{t(r-a)}$ del disipador para cada caso.

$$R_{t(r-a)_1} = \frac{T_a - R_{t(jD-c)}P_{\text{Diodo}}}{P_{\text{IGBT}} + P_{\text{Diodo}}} = 0,141 \text{ K/W} \quad (8.16)$$

$$R_{t(r-a)_2} = \frac{T_a - R_{t(jT-c)}P_{\text{IGBT}}}{P_{\text{IGBT}} + P_{\text{Diodo}}} = 0,136 \text{ K/W} \quad (8.17)$$

Según nuestro cálculo el peor caso es el del IGBT. Buscamos un disipador comercial con una resistencia térmica de valor inferior y que tenga un tamaño que se corresponda a nuestro módulo (una longitud de aproximadamente 100 mm). Finalmente seleccionamos el siguiente disipador:

$$R_{t(r-a)_{890SP}} = 0,12 \text{ K/W} < 0,136 \text{ K/W} \quad (\text{Es válido}) \quad (8.18)$$

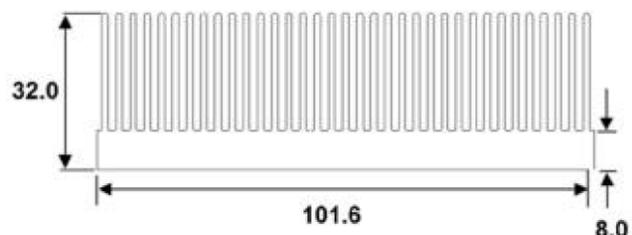


Figura 16. Marston 890SP. Disipador térmico elegido para el módulo IGBT



Tenemos que tener en cuenta que estos esfuerzos son transitorios. El convertidor podría calentarse durante unos segundos, pero después tendría un minuto entero para refrigerarse y disipar la energía almacenada. En la simulación, nosotros le hemos dejado sin realizar ningún esfuerzo de $t=16s$ a $t=20s$ (un total de 4 segundos, ver Figura 15.2), pero es probable que tenga más tiempo para disipar esa energía. Además el viento y la velocidad del vehículo podrían ayudar a la disipación.

Asimismo, si por cualquier motivo se realizasen varias aceleraciones y frenados de forma consecutiva el disipador ha sido convenientemente sobredimensionado para que este hecho no produzca la ruptura térmica de los semiconductores.

9. PROTECCIONES

Aunque el dimensionamiento se ha realizado adecuadamente y el programa de control se encargará de que el sistema no se salga fuera de los límites de trabajo, vamos a incluir unos fusibles para evitar sobrecargas y cortocircuitos que puedan dañar las baterías, supercondensadores o motor, ya que son los elementos más costosos del circuito. La posición de los fusibles puede verse en la Figura 17.

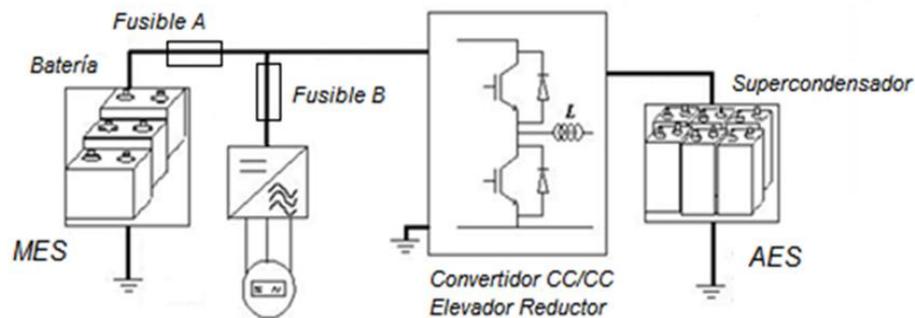


Figura 17. Circuito general con fusibles incluidos

El fusible designado como A es el que protege las baterías. La corriente normalmente no debería superar los 60 A ideales o los 100 A que consideramos como aceptables. Sin embargo, existen situaciones excepcionales en que la corriente por las baterías sí supera estos límites, pudiendo alcanzar los 197 A máximos del motor. Por ejemplo, cuando el supercondensador se agota al final de una aceleración superior a los requisitos planteados o en una pendiente extremadamente larga. También la corriente por las baterías puede alcanzar grandes valores negativos, cuando el supercondensador se carga al máximo tras sucesivos frenados regenerativos durante un descenso muy largo.



El fusible designado como B es el que protege el motor, cuya corriente máxima será de 197 A. Sin embargo, durante el arranque la corriente por el motor puede llegar a ser de 3 a 8 veces superior. Para evitar que el fusible salte o envejezca tras varios arranques necesitamos que tenga una respuesta lenta ante sobrecargas y rápida ante cortocircuitos.

Por estos motivos escogemos unos **fusibles tipo aM** (diseñados específicamente para acompañar un motor) de **200 A de corriente nominal** (SIBA NH 690 V) para ambos fusibles A y B de la Figura 17.

En cuanto al convertidor, no serán necesarios fusibles para proteger a los semiconductores, ya que el driver seleccionado para el módulo de los IGBT incluye protección contra cortocircuitos, bloqueando los semiconductores cuando la corriente se vuelve demasiado elevada.

En cuanto al aislamiento, el cableado del circuito de potencia deberá usar cables de tensión asignada de hasta 0,6/1 kV. Asimismo, los diferentes elementos deberán ir convenientemente sujetos y protegidos mecánicamente. También deberán ir acolchados, con el objetivo de no sufrir el desgaste mecánico causado por las vibraciones que se generan en el vehículo, tal y como se indica en el pliego de condiciones técnicas particulares.

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ANEXO N°9

APLICACIÓN PRÁCTICA:

ANÁLISIS DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE LA CONMUTACIÓN.....	2
2.1. Control PWM.....	2
2.2. Control PFM.....	3
2.3. Control por banda de histéresis.....	3
3. FORMAS DE REGULACIÓN DEL CONVERTIDOR CC-CC.....	3
3.1. Control lineal.....	4
3.1.1 Control por realimentación del lazo de tensión de salida (modo tensión VMC). 4	
3.1.2 Control por realimentación del estado (modo corriente).....	5
3.2. Control inteligente.....	9
4. COMPARACIÓN Y CONCLUSIONES.....	10



1. INTRODUCCIÓN

Tras el estudio realizado en el anexo N°7, *Convertidores CC-CC para sistema MES-AES*, se seleccionó finalmente un convertidor CC-CC elevador-reductor que opera en el 1^{er} y 3^{er} cuadrante, invirtiendo la corriente. A continuación, estudiaremos las diferentes estrategias para el control de los semiconductores del convertidor.

2. ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE LA CONMUTACIÓN

2.1. Control PWM

La modulación por anchura de pulsos (PWM) consiste en modificar el ciclo de trabajo de una señal periódica, controlando así la cantidad de energía enviada o extraída a la carga. La tensión de salida depende del ciclo de trabajo del conmutador, que sigue la siguiente expresión:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (1)$$

La forma más común de un circuito PWM consiste en un comparador al que se conecta una señal de diente de sierra de frecuencia constante y otra señal de control cuyo valor va a definir el ancho del pulso δ , tal como se refleja en la ecuación 2 y Figura 1:

$$\delta = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{u_{control}}{u_{triangular}} \quad (2)$$

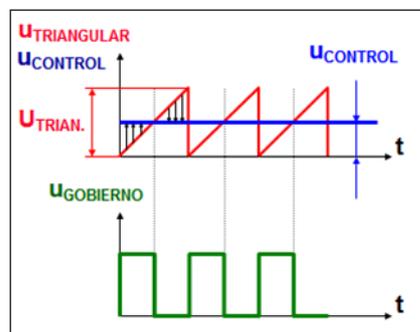


Figura 1. Ejemplo de Control PWM (modo tensión)

Este sistema resulta más sencillo que otros, ya que mantiene la frecuencia de conmutación fija y resulta más sencillo realizar el filtrado de la señal de salida.



2.2. Control PFM

La modulación por frecuencia de pulsos (PFM) consiste en mantener fija la duración de encendido o apagado de los pulsos, variando únicamente la frecuencia de conmutación. El problema de este sistema es que, dada la frecuencia de conmutación variable, se complica el diseño del filtro de salida de la señal. Un ejemplo de estrategia de control puede verse en la Figura 2.

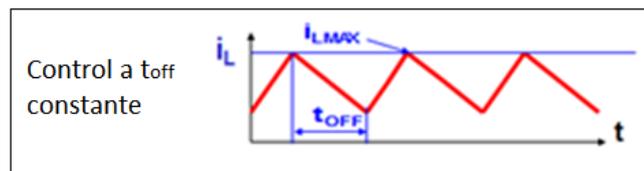


Figura 2. Control PFM (modo corriente)

2.3. Control por banda de histéresis

En este sistema se fija un nivel de corriente como referencia y se establece en torno a él una banda de histéresis (desviación de la corriente real sobre la de referencia). El interruptor se enciende (ON) cuando se alcanza el nivel mínimo de corriente y se apaga (OFF) cuando se alcanza el nivel máximo, manteniendo la corriente dentro de esa franja.

Este sistema debe trabajar siempre en régimen de conducción continuo. Un ejemplo de esta estrategia puede verse en la Figura 3.

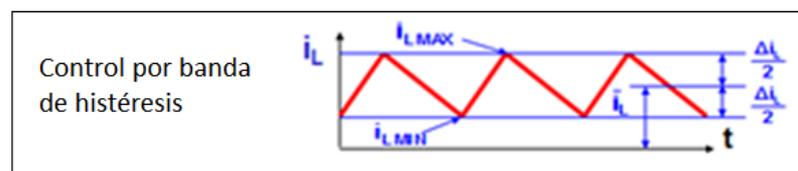


Figura 3. Control por banda de histéresis (modo corriente)

3. FORMAS DE REGULACIÓN DEL CONVERTIDOR CC-CC

Las estrategias anteriores necesitan de algún sistema que los regule. La modulación PWM necesita de una onda de control que establezca el ciclo de trabajo, el control por banda de histéresis necesita un valor de referencia entorno al que establecer una franja y la modulación PFM necesita de algún sistema que controle la variación de la frecuencia.



A continuación estudiaremos diferentes sistemas para realizar esta regulación, los cuáles pueden aplicarse a las estrategias de conmutación anteriores.

3.1. Control lineal

Los convertidores CC-CC conmutados son esencialmente sistemas no lineales. Cada vez que un diodo, IGBT, etc., cambia de estado de conducción varían las ecuaciones que rigen el sistema. No obstante, se puede considerar a cada uno de esos estados del circuito como un sistema lineal, de tal forma que se pueden emplear técnicas de control lineales. Para ello se emplean la regulación por lazo de tensión y por lazo de corriente.

3.1.1 Control por realimentación del lazo de tensión de salida (modo tensión VMC)

Esta estrategia consiste en la realimentación negativa de la tensión de salida V_o , consiguiendo que la respuesta siga a la tensión de referencia V_{ref} , empleando una de las estrategias de conmutación anteriores.

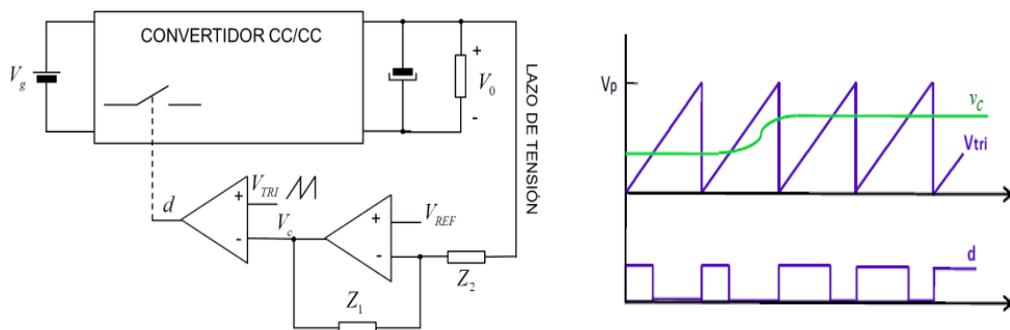


Figura 4. Regulación en modo tensión (utilizando control PWM)

Ventajas:

- La principal ventaja de este sistema radica en su sencillez.

Desventajas:

- Velocidad de respuesta lenta ante variaciones bruscas en la entrada.
- Requiere alta ganancia del lazo.



Otro problema que puede aparecer consiste en que, según el valor y la forma de la onda, pueden llegar a producirse disparos dobles indeseados, como los que pueden verse en la Figura 5.

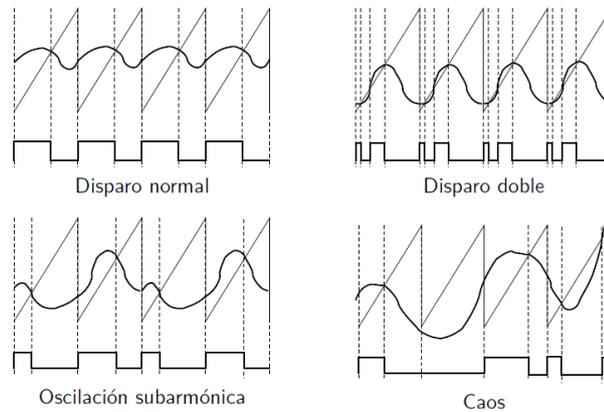


Figura 5. Funcionamientos incorrectos. Dependen de la forma de onda

Para evitar este problema se puede incluir un biestable síncrono (tipo flip-flop), eliminando los disparos múltiples y consiguiendo que se produzca un solo disparo por periodo, como se puede ver en la Figura 6. Al inicio de cada ciclo se pone a ON la señal PWM. El Reset del PWM se produce cuando la señal triangular supera el error entre la tensión de referencia y de salida. De esta forma no puede haber un segundo disparo hasta el siguiente ciclo.

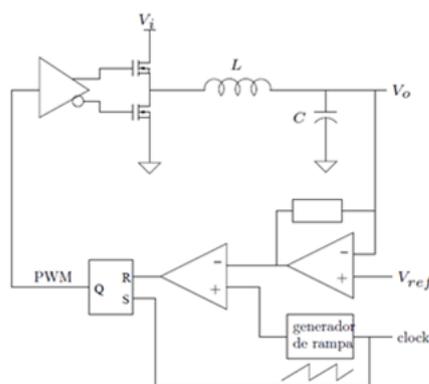


Figura 6. Modulación con cerrojo (Latch), en modo tensión

3.1.2 Control por realimentación del estado (modo corriente)

Utiliza dos lazos de realimentación. Además del lazo externo de tensión, utiliza un nuevo lazo interno de realimentación de la corriente, mejorando el comportamiento del convertidor. Midiendo la corriente en la bobina y comparándola con una



intensidad de referencia a seguir se consigue que la intensidad se mantenga aproximadamente constante, comportándose la bobina como una fuente de corriente controlada por tensión.

Dentro de esta regulación nos encontramos dos tipos: modo corriente promediado y modo corriente de pico.

➤ **Modo corriente promediada (ACM)**

Como su nombre indica, esta estrategia trabaja con valores medios de corriente (valores medios durante el tiempo de muestreo). Este sistema puede verse en la Figura 7.

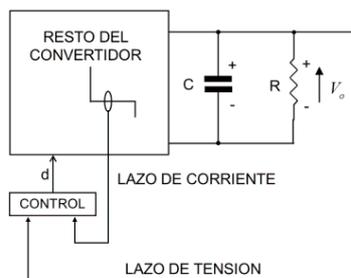


Figura 7. Regulación en modo corriente promediada ACM (esquema general)

Un ejemplo de este sistema de regulación aplicando una de las anteriores estrategias de conmutación puede verse en la Figura 8. Conviene recordar que aunque realmente se mide la corriente, esta se transforma proporcionalmente a tensión al pasar por $K(\Omega)$.

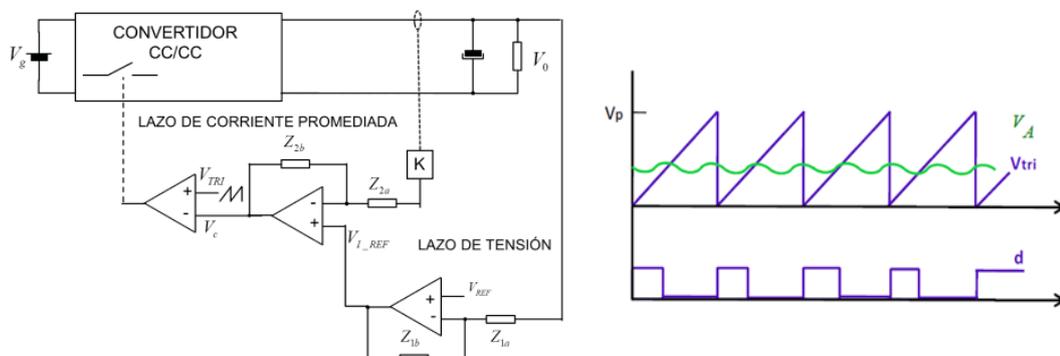


Figura 8. Regulación ACM (utilizando control PWM)



Ventajas:

- Ganancia mayor a bajas frecuencias.
- Buena estabilidad. No presenta inestabilidades para ciclos de trabajo $D > 0.5$
- Mayor inmunidad al ruido. Se mide el valor promedio de la corriente, que no se ve afectado por el ruido.
- Mejor impedancia de salida.

Desventajas:

- Mayor complejidad y coste, al añadir el lazo interno.
- Depende en cierta medida de dónde se mide la corriente.

➤ Modo corriente de pico (CMC)

Esta estrategia difiere de la anterior en que trabaja con valores instantáneos. El esquema que explica este sistema puede verse en la Figura 9.

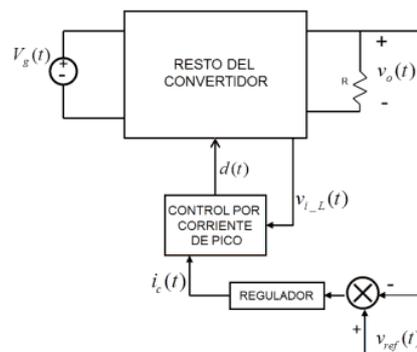


Figura 9. Regulación en modo corriente de pico CMC (esquema general)

Este tipo de control lleva implícitamente implementado un lazo feedforward o alimentación delantera. Con este tipo de alimentación las perturbaciones son corregidas en la entrada de tal forma que esta estrategia de control funciona también como protección contra sobrecorrientes, protegiendo a los elementos del convertidor durante estados transitorios.

Un ejemplo de este sistema de regulación aplicando una de las anteriores estrategias de conmutación puede verse en la Figura 10.

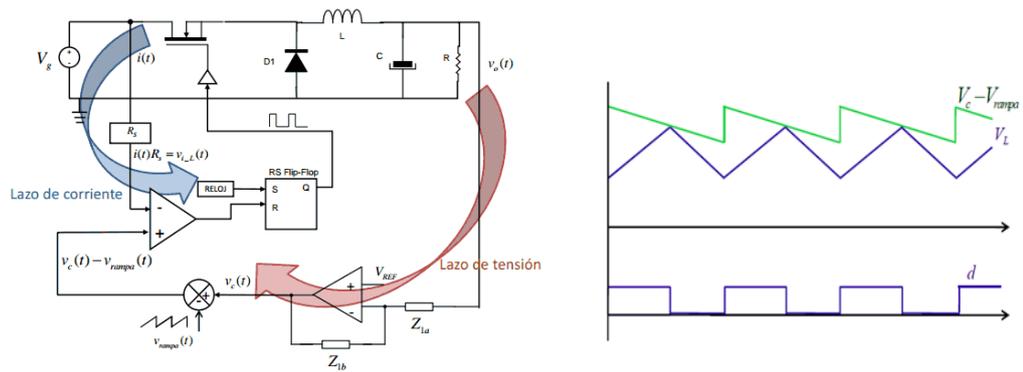


Figura 10. Regulación CMC (utilizando control PWM)

Ventajas:

- Es independiente del lugar en que se mide la corriente, ya que no se toman valores medios sino instantáneos.
- Es un sistema de primer orden y con un ancho de banda mayor.
- Protegido contra sobrecorrientes.

Desventajas

- Es más susceptible al ruido.
- Mayor coste, pero mejor relación prestaciones-coste respecto a la anterior.

Dentro de la estrategia CMC puede distinguirse entre la estrategia de regulación por corriente de pico (PCMC) y la estrategia de regulación por corriente de valle (VCMC), pero en general se usa la primera. De hecho, entre todos los sistemas anteriores, la técnica de regulación más extendida es la de modo corriente de pico.

○ Métodos de medida de corriente

Dependiendo del tipo de regulación utilizada, convendrá medir la corriente en una parte del circuito u otra. Asimismo, dependiendo los valores de la corriente, de la precisión que sea necesaria, así como del coste que podamos permitirnos, utilizaremos diferentes métodos para la medición de esta intensidad. Algunas de las diferentes posibilidades se comparan en la Tabla 1.



Tabla 1. Comparación de métodos para la medida de la corriente

Método	Precisión	Eficiencia	Coste	Ancho de Banda
Transformador de medida	Alta	Alta	Muy alto	Alto
Efecto Hall	Alta	Alta	Alto	Medio
Resistencia	Alta	Muy baja	Medio	Alta
Sensor inductor	Medio	Alta	Bajo	Medio

3.2. Control inteligente

Con el fin de mejorar las prestaciones actuales se desarrollan sistemas de procesamiento digital de la señal (DSP), que hacen posible plantear algoritmos de control de mayor complejidad.

Algunas de estas técnicas sustituyen el regulador lineal convencional por un regulador borroso, cuyo funcionamiento imita al de un regulador convencional PI.

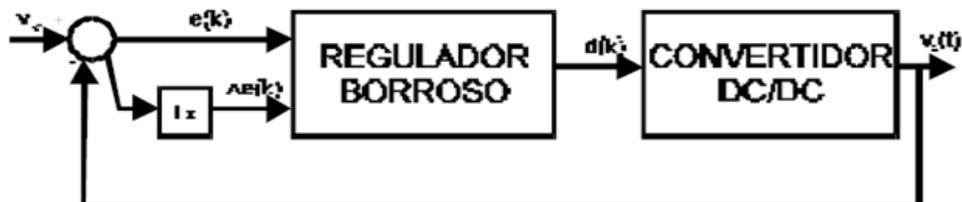


Figura 12. Control borroso de un convertidor CC-CC

Actualmente el coste de estos sistemas no resulta demasiado elevado. Sin embargo, su mayor complejidad no siempre justifica sus prestaciones, similares a las de un regulador PID.

Otras posibilidades son el control no lineal en modo deslizante (también llamado control geométrico), o la aplicación de técnicas de control robusto, que consiste en asumir desde el comienzo del modelo matemático una cierta incertidumbre (tal como se ve en la ecuación 3), ya que el modelo teórico y el final de la planta no son exactamente iguales.

$$G_{Real}(s) = G_{Teórica}(s)(1 + \Delta(s)) \quad (3)$$

Sin embargo, el control en modo deslizante posee un análisis y diseño muy complejo; y las técnicas de control robusto dan lugar a sistemas de orden elevado que realmente pueden aproximarse por otros más sencillos. Por estas razones no han sido tenidos en cuenta a la hora de desarrollar el sistema de control.



4. COMPARACIÓN Y CONCLUSIONES

Las estrategias que utilizan frecuencia de conmutación variable (PFM) no resultan interesantes, ya que el filtrado de la tensión de salida se complica.

La corriente por nuestro circuito va a depender de la tensión de baterías y supercondensadores. Estas tensiones van a variar considerablemente a lo largo del funcionamiento. Debido a esto, la pendiente con la que aumenta o desciende la corriente también va a ser variable. Por lo tanto, en el control por banda de histéresis no vamos a conocer y controlar la frecuencia exacta a la que conmutan los IGBT, ya que la razón de tiempos a la que la corriente se sale de la banda establecida varía constantemente.

Por todo esto, utilizaremos la estrategia que utiliza una frecuencia de conmutación fija: control PWM.

En cuanto a las estrategias de regulación, la regulación en modo tensión presenta importantes limitaciones, principalmente una velocidad de respuesta más lenta. Sus prestaciones son considerablemente mejoradas por el control por corriente, sin que esto suponga un coste o complejidad muy superiores. Además, el control por corriente de pico es una técnica más completa que nos permite controlar la corriente máxima incluyendo así protección contra sobrecorrientes, por lo que nos inclinamos más por este último.

Por otro lado, para realizar nuestro sistema de control, necesitaremos utilizar algunas variables más que la corriente y la tensión (por ejemplo, la velocidad), así como ejecutar otras operaciones adicionales. Por este motivo se utilizará un DSP, ya que aunque el coste sea algo mayor la eficiencia y funcionalidad obtenidas serán considerablemente superiores.

En resumen, utilizaremos una estrategia de control PWM regulada mediante lazo de corriente de pico (que incluye lazo de tensión) utilizando un DSP, el cual nos permitirá desarrollar un sistema de control más complejo y eficiente.

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ANEXO N°10

APLICACIÓN PRÁCTICA:

**DESARROLLO DEL ALGORITMO
DE CONTROL**

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.	DESCRIPCIÓN DE ENTRADAS PRINCIPALES	2
3.	GESTIÓN DEL ESTADO DE CARGA DEL SUPERCONDENSADOR	3
3.1	Modo Normal.....	6
3.2	Modo Deportivo.....	6
3.3	Modo Escalada.....	8
3.4	Modo Descenso	10
3.5	Modos de gestión del SOC. Resumen.	12
3.6	Corriente en el supercondensador	13
3.6.1	Límites para la corriente de ajuste del SOC	14
3.7	Conclusión de la gestión del SOC.....	16
4.	ACELERACIONES Y FRENADOS. LIMITACIÓN DE LA CORRIENTE POR LAS BATERÍAS	17
5.	PROGRAMA DE CONTROL (PSIM)	20
5.1	Otras entradas y salidas.....	28
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30



1. INTRODUCCIÓN

Como se ha venido explicando a lo largo de todo el trabajo, el sistema AES basado en supercondensadores es el principal encargado de realizar las aceleraciones y frenados regenerativos, con el objetivo principal de evitar grandes corrientes en la batería, alargando su vida útil.

Para que esto sea posible, debe existir un sistema de control capaz de limitar la corriente por las baterías y recurrir al sistema AES en aquellos casos en los que el banco de supercondensadores sea necesario. El sistema de potencia se ha desarrollado de tal forma que la energía del AES esté disponible en la mayoría de ocasiones. (No estaba preparado para afrontar algunos eventos como pendientes extremadamente prolongadas, ya que para que esto fuese posible habría que sobredimensionar considerablemente el sistema y no sería rentable).

Para conseguir los objetivos y como veremos a continuación, el sistema de control debe gestionar correctamente el estado de carga del supercondensador. Además deberemos alcanzar el mayor rendimiento posible, para reducir al usuario el gasto en electricidad al realizar la recarga de las baterías y también para aumentar la autonomía del vehículo, que se tratan de características claves de cara a la venta y rentabilidad del vehículo eléctrico.

2. DESCRIPCIÓN DE ENTRADAS PRINCIPALES

Para controlar todo el sistema se deben obtener las siguientes variables.

- Corriente exigida por el motor. Ya que dependiendo de su valor podremos saber si debe entrar en actuación o no el sistema AES.
- Tensión de las baterías. Ya que su valor va a influir en la corriente intercambiada entre el sistema MES (baterías de litio) y AES (banco de supercondensadores). Dependiendo del nivel de tensión de las baterías el ciclo de conducción del IGBT será diferente.
- Estado de carga de las baterías. La obtendremos a partir de un contador de Ah (realizado mediante programa). Esto es debido a que la tensión de las baterías no es una medida fiable para obtener su carga, ya que depende también de la corriente que se le haya exigido anteriormente, valor inicial de tensión, etc.



- Velocidad del vehículo. Para poder gestionar correctamente la carga de referencia del supercondensador, como se ve en el apartado 3 de este anexo.
- Tensión en el supercondensador. En este caso la tensión sí permite conocer su estado de carga real, para compararlo con la carga de referencia. También influye en la corriente intercambiada entre el sistema MES-AES.
- Corriente actual por el supercondensador. Debemos comparar la corriente actual con la corriente que deseamos que exista, para mandar las señales adecuadas a los IGBT y alcanzar la corriente de referencia calculada por el sistema de control.

Si solo se requiere mantener la velocidad, la corriente por el sistema AES será baja (para ajustar el nivel de tensión del supercondensador) o incluso nula (si ya se ha alcanzado la tensión de referencia).

Si en cambio se produce una aceleración o frenado variaremos su valor (negativo o positivo) hasta el valor exigido por el sistema de tracción, evitando que la corriente por las baterías se vuelva demasiado elevada.

- Otras variables. Otra variable que puede medirse es la temperatura de la batería de litio.

3. GESTIÓN DEL ESTADO DE CARGA DEL SUPERCONDENSADOR

Para poder realizar correctamente aceleraciones y frenados se debe gestionar el estado de carga (en adelante SOC) del supercondensador. El SOC deberá tener el valor indicado para afrontar la siguiente situación más probable.

Al arrancar el vehículo con velocidad nula, el SOC deberá ser del 100 % (preparado para la aceleración), ya que además la probabilidad de realizar un frenado regenerativo es 0.

En el caso contrario, circulando a velocidades altas (100 km/h), el SOC deberá ser bajo (preparado para absorber la energía de un frenado), ya que además la probabilidad de realizar un frenado es mucho mayor a la de que se aumente aún más la velocidad.



Como se puede deducir, a velocidades intermedias el SOC deberá tener un valor intermedio, ya que ambas situaciones son posibles, aceleraciones o frenados.

Evidentemente, el sistema no funcionaría correctamente si cuando queremos realizar una aceleración el supercondensador está descargado y sin apenas energía, y si cuando se requiere absorber la energía del frenado el supercondensador está ya cargado al máximo.

Esta energía faltante o sobrante se intercambia con el paquete de baterías, aprovechando los tiempos en que el vehículo solamente requiere mantener la velocidad. Esto es posible debido a que durante los periodos de velocidad constante la demanda energética es baja, y las baterías pueden aportar por si solas la energía suficiente para vencer los esfuerzos de rodadura y aerodinámicos.

En la Figura 1 podemos ver de forma simplificada cómo debe gestionarse el SOC del supercondensador.

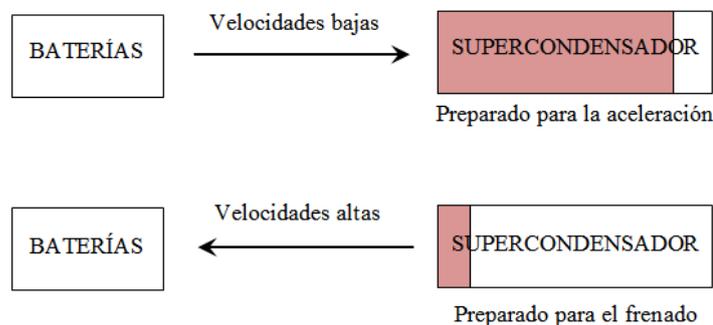


Figura 1. Gestión del estado de carga del supercondensador

Así pues, debemos establecer una relación entre el SOC y la velocidad, como puede verse en la ecuación 1.

$$SOC_{supercondensador} = f(velocidad) \quad (1)$$

La gestión del SOC del supercondensador puede no depender solo de la velocidad, sino también del estado de carga de la batería [1]. Esto se debe a que la potencia de las baterías se va reduciendo según se descargan. En la Figura 2 puede verse como varía el SOC del supercondensador en función del DOD (profundidad de descarga) de las baterías.

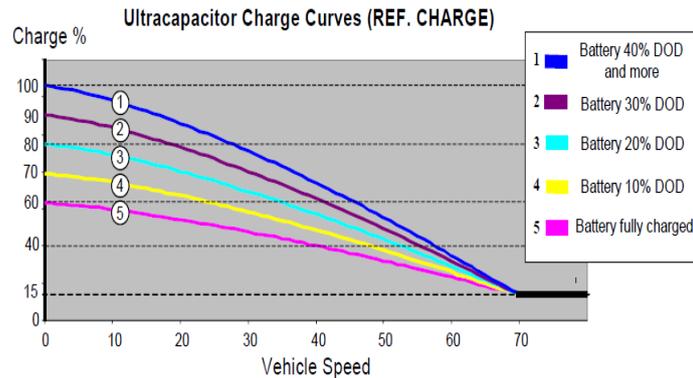


Figura 2. Estado de carga (SOC) del supercondensador en función de la velocidad y la profundidad de descarga (DOD) de las baterías [1]

Calculamos la pérdida de potencia de la batería elegida según se descarga (del 100 % al 10 % de su carga):

$$P_{100\%} = V_{\text{máx}} \cdot I_{\text{Límite}} = 400 \text{ V} \cdot 60 \text{ A} = 24 \text{ kW} \quad (2)$$

$$P_{10\%} = V_{\text{mín}} \cdot I_{\text{Límite}} = 336 \text{ V} \cdot 60 \text{ A} = 20,16 \text{ kW} \quad (3)$$

$$\Delta P = 3,84 \text{ kW} \Rightarrow \Delta P(\%) = \frac{3,84 \text{ kW}}{24 \text{ kW}} \cdot 100 = 16 \% \quad (4)$$

Durante el 90 % del rango de descarga, la potencia que es capaz de entregar la batería manteniendo la corriente en los límites que nos hemos marcado (60 A) solo varía un 16 %, según la Ecuación 4. Por este motivo, no hemos considerado que la pérdida de potencia de las baterías sea demasiado relevante, ya que en cualquier caso el supercondensador se encargará de aportar la potencia restante cuando exista un frenado y aceleración.

Sin embargo, para el correcto funcionamiento del sistema y mejorar las prestaciones del vehículo ante diferentes situaciones de conducción, una sola curva de gestión del SOC resulta insuficiente. Por este motivo en este trabajo se han desarrollado diferentes curvas, atendiendo a la situación de conducción (y no al DOD de las baterías, como en la Figura 2).

La forma y pendiente de nuestras curvas son aproximadas, tomando la curva de la Figura 2 como base, guardando una cierta relación de proporcionalidad. Para conocer su forma exacta se deberían realizar diferentes pruebas de eficiencia y funcionamiento con varios tipos de vehículos y diferentes tipos de circuitos de



conducción, optimizando el rendimiento, lo cual está fuera de nuestro alcance. Sin embargo, la forma final no será muy diferente de la aproximada y es válida para realizar nuestro diseño y simulaciones.

3.1 Modo Normal

Como conclusión de lo anterior, sabemos que a 0 km/h el SOC debe ser del 100 %, y a 100 km/h el supercondensador debe estar descargado. Sin embargo, para evitar sobrecorrientes y cortocircuitos a la hora de absorber el frenado, consideraremos el sistema descargado en un límite del 30 % de su energía, lo cual deja un 70 % restante para absorber frenados. Este valor del 30 % corresponde a una tensión de 170 V (para saber más ver el apartado 3.1 del anexo N°8).

De esta forma hemos aproximado la función de la Ecuación 1 a la siguiente curva visible en la Figura 3.

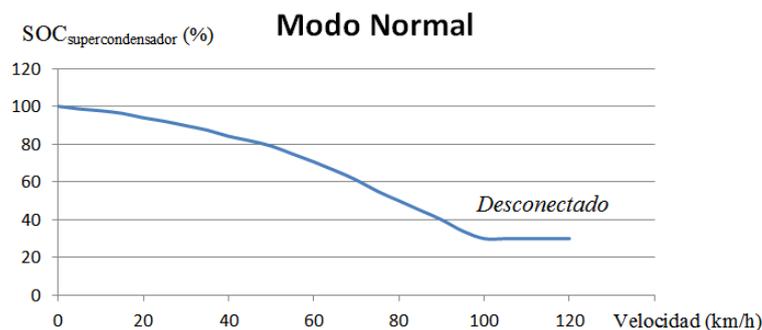


Figura 3. Gestión del SOC en Modo Normal

3.2 Modo Deportivo

El **Modo Normal** anterior, es un modo versátil de gestión del SOC, capaz de funcionar de forma aceptable en la mayoría de situaciones de conducción.

De hecho, el Modo Normal es capaz de alcanzar velocidades altas. El problema es que una vez alcanzadas, el supercondensador se descarga para preparar un frenado, impidiendo acelerar en una segunda ocasión.

Observando la Figura 3, podemos ver como circulando a 90 km/h apenas queda energía utilizable en el supercondensador (40 %), ya que nunca bajaremos del 30 % (solamente un 10 % utilizable en esa situación). Por lo tanto, el vehículo tendría problemas al acelerar a velocidades mayores (ej.: 120 km/h).



Ante esta problemática tenemos dos opciones. Una consiste en limitar la potencia que desarrolla el motor, afectando a las prestaciones del vehículo, lo cual es vital de cara a su venta. Además, limitar la potencia del motor a mitad de un adelantamiento también sería un riesgo para la seguridad.

La otra opción consiste en no limitar el motor y permitir que, cuando el supercondensador se agote, la corriente por las baterías supere el límite que hemos fijado (60 A). La segunda opción también es indeseable, ya que reduce la vida útil de las baterías, contraviniendo uno de nuestros principales objetivos.

Para solucionar esto se ha desarrollado el **Modo Deportivo**. Este modo de gestión mantiene valores de SOC más elevados a velocidades mayores. Este sistema nos permite seguir acelerando a velocidades más altas. La curva con los valores del SOC correspondientes a cada velocidad en el Modo Deportivo puede verse en la Figura 4.

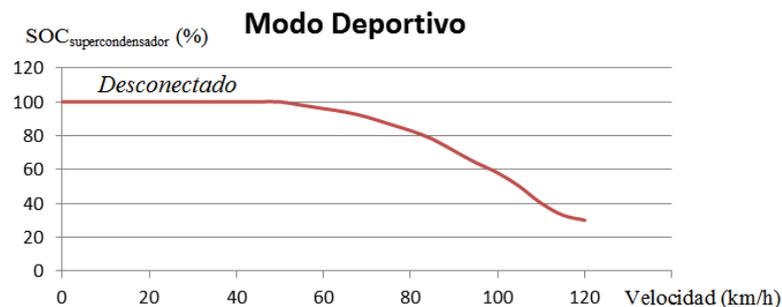


Figura 4. Gestión del SOC en Modo Deportivo

El Modo Deportivo está pensado para funcionar a altas velocidades en carretera abierta. No está preparado para funcionar a bajas velocidades, ya que no puede absorber frenados por debajo de 50 km/h. Por este motivo este sistema se puede conectar manualmente a partir de 50 km/h (por ejemplo, cuando el conductor sabe que va a incorporarse a una autovía). También se conecta de forma automática en cuanto se alcanzan velocidades superiores a 100 km/h.

El Modo Deportivo se desconecta automáticamente cuando resulta innecesario y poco eficiente, cuando la velocidad desciende de 50 km/h, regresando al Modo Normal.

También se ha desarrollado un esquema explicativo de la utilidad del Modo Deportivo frente al Modo Normal, representado en la Figura 5.

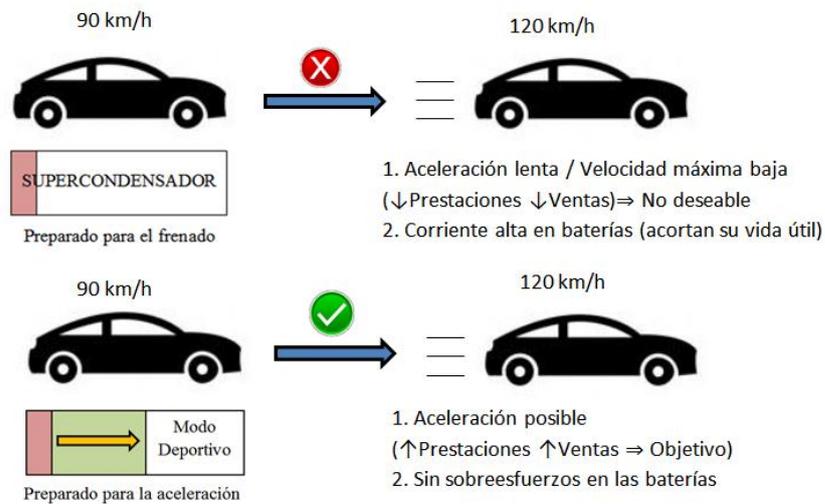


Figura 5. Esquema explicativo. Utilidad del Modo Deportivo (abajo) frente al Modo Normal (arriba)

3.3 Modo Escalada

Como podemos ver en las Figura 3 y 4, el SOC solo depende de la velocidad. El sistema no tiene en cuenta si existe una pendiente próxima, la cual va a requerir todo el SOC del supercondensador.

Por ejemplo, circulando a una velocidad alta tanto en Modo Normal como en Modo Deportivo, el supercondensador estará principalmente descargado, ya que el sistema supone que lo más probable es realizar un frenado.

Ambos sistemas anteriores solo tienen en cuenta la variación de energía cinética debido a la velocidad, y no tienen en cuenta variaciones en la energía potencial. Por lo tanto, el sistema no está preparado para una hipotética pendiente que podríamos tener en frente.

Con los Modos Normal y Deportivo, ante un ascenso prolongado tendríamos dos opciones. Una consiste en limitar la corriente por el motor, obligándolo a reducir la velocidad del ascenso cuando se agota el supercondensador. Para conseguir una buena imagen del vehículo eléctrico, nos interesa poder realizar la pendiente a un ritmo similar al de un vehículo convencional.

La otra opción consiste en permitir nuevamente que la corriente por las baterías supere nuestro límite fijado, lo cual también es indeseable, ya que reduce su vida útil.



Para evitar esto se ha implementado el **Modo Escalada**, que mantiene siempre altos valores de SOC (un mínimo del 90 %) y está siempre preparado para afrontar largas pendientes. La curva con los valores del SOC correspondientes a cada velocidad en el Modo Escalada puede verse en la Figura 6.

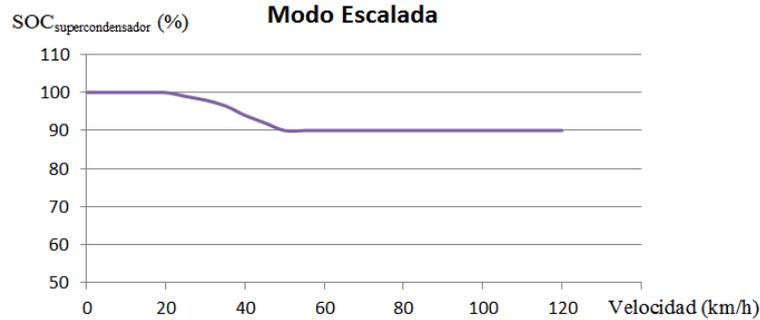


Figura 6. Gestión del SOC en Modo Escalada

También se ha desarrollado un esquema explicativo de la utilidad del Modo Escalada frente al Modo Normal, representado en la Figura 7.

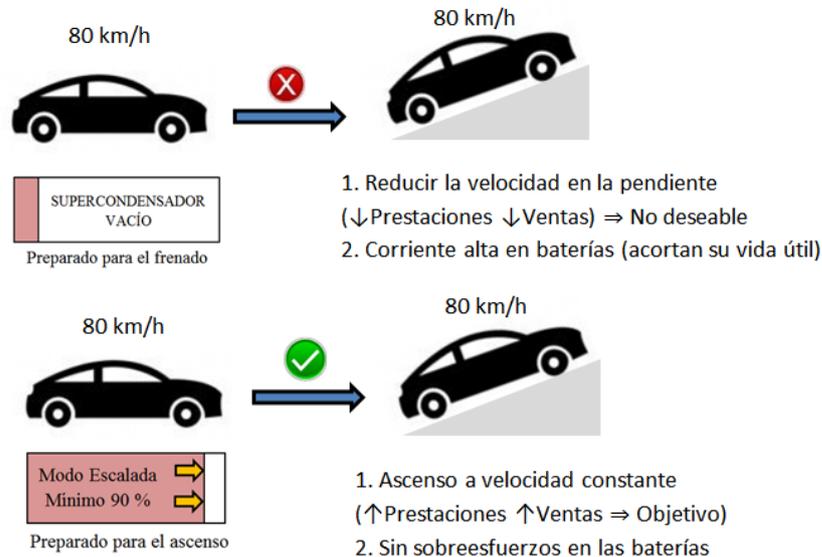


Figura 7. Esquema explicativo. Utilidad del Modo Escalada (abajo) frente al Modo Normal (arriba)

El Modo Escalada también es un modo útil para afrontar varias pendientes cortas sucesivas, ya que aprovecha los tramos llanos para recargar al máximo el SOC del supercondensador para afrontar la siguiente pendiente. También podría usarse como sistema para todoterreno, incluyendo los correspondientes cambios en el sistema de tracción.



Este modo se puede conectar y desconectar manualmente a cualquier velocidad. Aunque también es un modo que permite acelerar a velocidades altas la idea es utilizarlo especialmente para afrontar pendientes. No es conveniente mantenerlo conectado siempre, ya que apenas permite absorber energía del frenado, reduciendo la eficiencia y pudiendo perjudicar también a las baterías.

Hemos decidido descargarlo un poco (al 90 %) a velocidades altas, para que pueda absorber parte de un frenado sin provocar una sobretensión en el supercondensador. De todas formas, el sistema de control está diseñado para evitar sobretensiones.

El Modo Normal también permite realizar pendientes a baja velocidad (en ciudad), ya que sí guarda altos valores de SOC a bajas velocidades (ver Figura 3). Por este motivo sigue siendo el modo de gestión más versátil.

3.4 Modo Descenso

Volviendo a la Figura 3, podemos ver como a velocidades bajas el supercondensador está prácticamente cargado al máximo (al 90-100 %), preparado para realizar aceleraciones y no para absorber frenados.

Ante un tramo de descensos consecutivos (con sucesivas curvas, paradas y frenados) el sistema no podría regenerar toda la energía aprovechable. El supercondensador acabaría cargándose al máximo y tampoco es deseable que las baterías absorban altas corrientes de regeneración. Una opción sería activar el frenado convencional, pero esa alternativa se traduce en desperdiciar energía aprovechable y otro de nuestros objetivos consistía en aumentar al máximo la eficiencia y autonomía del vehículo.

Para que el sistema esté preparado para largos tramos de bajada se ha desarrollado el Modo Descenso, que guarda siempre valores bajos de SOC. Incluso con el vehículo detenido el SOC no superará el 90 %, aumentando así la capacidad regenerativa del supercondensador.

La curva con los valores del SOC correspondientes a cada velocidad en Modo Escalada puede verse en la Figura 8.

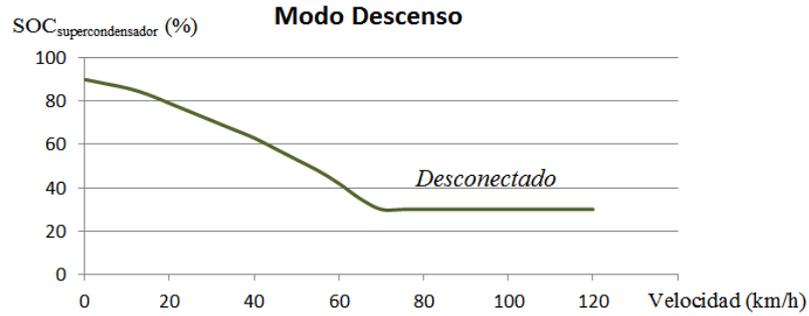


Figura 8. Gestión del SOC en Modo Descenso

El esquema explicativo de la utilidad del Modo Descenso frente al Modo Normal se encuentra representado en la Figura 9.

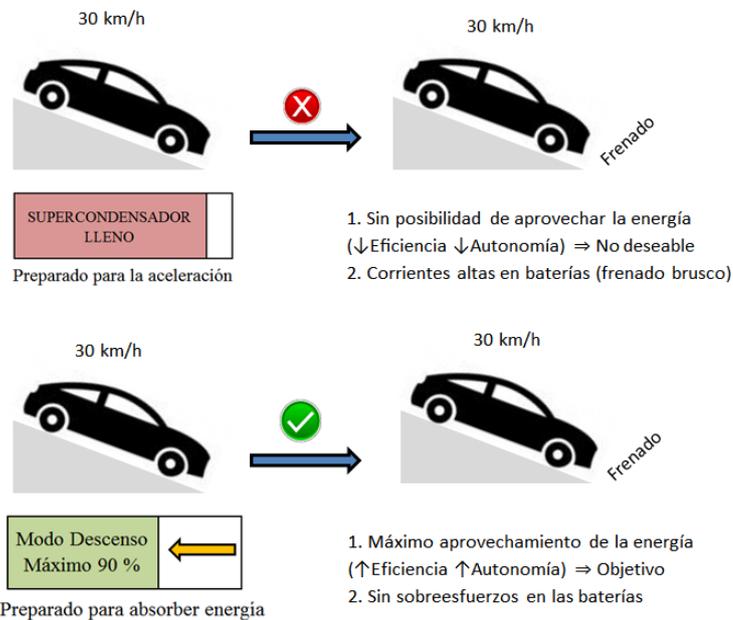


Figura 9. Esquema explicativo. Utilidad del Modo Descenso (abajo) frente al Modo Normal (arriba)

Independientemente del grado de la pendiente, el Modo Descenso también se puede utilizar en un entorno urbano, ya que aceleraciones poco exigentes (0-50 km/h) se realizan sin problemas.

En cambio, no está preparado para alcanzar velocidades altas. Por este motivo, el Modo Descenso se desconecta automáticamente (pasando al Modo Manual) en cuanto se sobrepasan los 70 km/h, a partir de los cuales resulta nocivo. Se puede volver a conectar de forma manual en cuánto se desciende de esa velocidad.



3.5 Modos de gestión del SOC. Resumen.

Gracias a los modos de gestión del SOC explicados, mediante unos pequeños cambios en el sistema de control puede mejorarse el comportamiento y prestaciones del vehículo ante diferentes situaciones de conducción, sin la necesidad de tener que sobredimensionar el costoso supercondensador para que sea capaz de abordar todo tipo de situaciones. Los diferentes Modos de gestión del SOC pueden verse agrupados en la Figura 10.

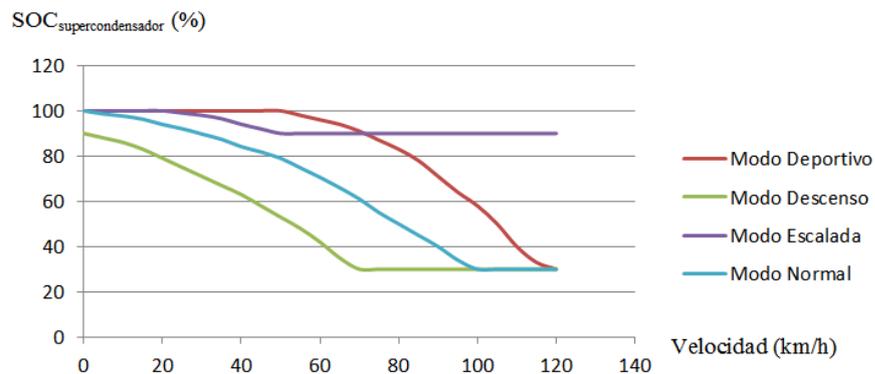


Figura 10. Diferentes modos de Gestión SOC

El **Modo Normal**, es el que se adapta a la mayoría de las situaciones. Sin embargo, no es bueno acelerando o enfrentando pendientes a velocidades altas.

El **Modo Deportivo** nos permite seguir acelerando aún a altas velocidades, manteniendo la eficiencia y sin ningún desgaste sobre las baterías. Es un modo de gestión innecesario y poco eficiente a bajas velocidades, por lo que se desconecta en esos casos.

El **Modo Escalada** mantiene un nivel de SOC alto y permite afrontar largas pendientes, aprovechando tramos llanos para recargar el supercondensador hasta un nivel del 90-100 %. Ya que el conductor es el único capaz de conocer si existe o no una pendiente en las cercanías se conecta y desconecta manualmente.

El **Modo Descenso** mantiene niveles de SOC bajos para una mejor regeneración de energía en tramos especialmente lentos y descendentes. Es un modo nocivo a velocidades altas, por lo que se desconecta en esos casos.



Todos los modos de funcionamiento anteriores se justifican y se ponen en funcionamiento en el anexo N°11, denominado *Simulaciones y validación del algoritmo*, donde se pueden ver las diferencias existentes entre conectarlos o no y las mejoras que proporcionan frente al Modo Normal. La forma de conexión y desconexión de cada uno de los modos ha sido resumida en la Tabla 1.

Tabla 1. Conexión y Desconexión de los diferentes Modos de Gestión del SOC

Modo	Conexión	Desconexión
Normal	Manual/Automática	Manual/Automática
Deportivo	Manual (+50 km/h) Automático (+100 km/h)	Manual (-100 km/h) Automático (-50 km/h)
Escalada	Manual	Manual
Descenso	Manual (-70 km/h)	Automática (+70 km/h)

3.6 Corriente en el supercondensador

Para controlar el valor del SOC del supercondensador y cargarlo o descargarlo hasta cierto punto, dependiendo de la velocidad y modo de funcionamiento, como se puede ver en la Figura 10, necesitamos controlar la corriente I_{SC} que circula por el supercondensador. Para controlar I_{SC} necesitamos conocer el SOC_{real} , que se obtiene a través de la medida de la tensión siguiendo las ecuaciones 5 y 6.

$$E = 1/2 \cdot C \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (5)$$

$$SOC_{real}(\%) = \frac{E_{actual}}{E_{m\acute{a}x}} \cdot 100 = \frac{1/2 \cdot C \cdot V_{sc}^2}{1/2 \cdot C \cdot V_{m\acute{a}x}^2} \cdot 100 = \frac{V_{sc}^2}{(307,8V)^2} \cdot 100 \quad (6)$$

Posteriormente este valor se compara con el SOC de referencia (SOC_{ref}), que se obtiene a través de la medición de la velocidad, siguiendo las curvas de la Figura 10, que hemos aproximado con las siguientes ecuaciones (polinomios de grado 2):

$$\text{Modo Normal} \quad SOC = -0,0058v^2 - 0,1411v + 99,596 \quad (7)$$

$$\text{Modo Deportivo} \quad SOC = -0,0093v^2 + 0,5577v + 95,021 \quad (8)$$

$$\text{Modo Escalada} \quad SOC = -0,0067v^2 + 0,1352v + 99,682 \quad (9)$$

$$\text{Modo Caída} \quad SOC = -0,0062v^2 - 0,4431v + 90,4 \quad (10)$$



En cualquier caso, el resultado de las aproximaciones no podrá superar el límite máximo del 100 % ni el límite mínimo del 30 % (límites establecido por programa).

Otra opción para implementar los modos de funcionamiento sería introducir las coordenadas X (velocidad) e Y (SOC) de las curvas de la Figura 10 en una tabla (de forma semejante a la Tabla 1 del anexo N°11), haciendo que el programa interpole los puntos intermedios. Sin embargo, este método resultaba más complicado de implementar, por lo que utilizaremos las ecuaciones 7, 8, 9 y 10 anteriores.

3.6.1 Límites para la corriente de ajuste del SOC

Para que el SOC del supercondensador alcance rápido el valor de la referencia y el sistema AES esté rápidamente preparado para la siguiente aceleración o frenado, aumentaremos la señal de error ($SOC_{error} = SOC_{ref} - SOC_{real}$) multiplicándola con una constante de proporcionalidad alta ($Kp = 10$).

Para evitar que esta corriente que sirve para ajustar rápidamente el nivel del SOC desgaste las baterías limitamos la corriente de la siguiente forma:

A) Cuando la corriente en el motor es positiva ($0 < I < 60$)

Nos referimos a casos en los que la corriente exigida por el motor no es tan alta como para que las baterías requieran de la ayuda del supercondensador (tramos rectos, ligeras pendientes, pequeñas modificaciones de velocidad, etc.).

A1. Límite superior de 40 A

Esta situación se produce cuando las baterías tienen que mantener la velocidad a la vez que recargan el supercondensador. Ej.: tras salir de una pendiente ascendente, en la que el supercondensador se ha descargado considerablemente.

Como las baterías deben soportar un doble esfuerzo hemos limitado la corriente de carga del supercondensador a 40 A.

Según los resultados de la Tabla 2, circulando a 100 km/h en un terreno aproximadamente llano la corriente necesaria en las baterías para mantener la velocidad es de 42 A. Para cargar el supercondensador mientras se mantiene esa velocidad habría que aportar $40+42=82$ A en las baterías.

**Tabla 2. Corriente y potencia necesaria para mantener la velocidad (m=1400 kg)**

Velocidad	Potencia	Imotor
50 km/h	6 kW	15,8 A
100 km/h	16 kW	42 A

Aunque esto supera nuestro límite ideal (60 A), se ha considerado este valor aceptable. Además, la corriente no superaría los 60 A si circulamos a velocidades bajas (50 km/h): $16+40=56$ A.

A2. Límite inferior de -100 A

En este caso el supercondensador se descarga, repartiendo la corriente en mantener la velocidad del motor y recargar las baterías. Como las baterías solo van a recibir una parte de la corriente aumentamos el valor absoluto del límite (hasta -100 A).

- Si circulamos a velocidades bajas: $16-100=-84$ A.
- Si circulamos a velocidades altas: $42-100=-58$ A.

La situación que más tiempo dura (comparando la simulaciones del apartado 2.1 y 3.1 del anexo *Simulaciones y validación del algoritmo*) es la segunda (-58 A, valor que se encuentra dentro del límite de 60 A). Esta situación se corresponde a cuando el supercondensador tenga que descargarse hasta el mínimo cuando estamos circulando a una velocidad alta, preparándose para absorber un frenado.

B) Cuando la corriente en el motor es negativa ($-60 < I < 0$)

En este caso nos referimos a frenados tan pequeños que no ponen en actuación el sistema de frenado regenerativo mediante el supercondensador. La batería por si sola resulta suficiente para absorber el frenado.

B1. Límite superior de 100 A

Se corresponde a cuando el supercondensador quiere recargarse a la vez que se está realizando un frenado pequeño. Es una situación bastante corriente ya que después de un frenado el supercondensador se carga al 100 % para arrancar y acelerar.

A la corriente regenerativa del motor se suma la corriente de las baterías para cargar rápidamente el supercondensador al 100 %. Como son dos las corrientes que ayudan



a recargar el supercondensador hemos fijado el límite a 100 A (suponiendo que la parte que corresponde a las baterías se encontrará en torno a 60 A).

B2. Límite inferior de -40 A

Esta situación puede producirse tras varios frenados, por ejemplo en una pendiente descendiente. En estas situaciones las baterías absorben dos corrientes diferentes. Una es la corriente procedente del frenado regenerativo del motor. La otra proviene del supercondensador, que se ha cargado al máximo durante el frenado regenerativo del descenso y quiere descargarse sobre las baterías (para poder ayudar a absorber nuevamente un frenado más agresivo más adelante).

Para evitar que la corriente que absorbe las baterías sea demasiado elevada hemos reducido la corriente de descarga del supercondensador a -40 A.

3.7 Conclusión de la gestión del SOC

Aunque considerar y evaluar todos los casos posibles puede resultar un poco confuso, podemos resumirlo en que con la corriente del motor positiva hemos puesto un límite de 40 A de ese mismo signo y un límite de -100 A de signo contrario. Cuando el signo de la corriente por el motor es opuesto (regenerando energía) estos límites se invierten a -40 A y 100 A.

El objetivo de todo esto es que el valor de referencia SOC se alcance rápidamente, preparando en poco tiempo al sistema para realizar la próxima situación más probable: aceleración o frenado. Durante cualquier tipo de situación, el valor absoluto de la corriente por las baterías suele estar por debajo de los 60 A, en ningún caso el valor absoluto es superior a 100 A.

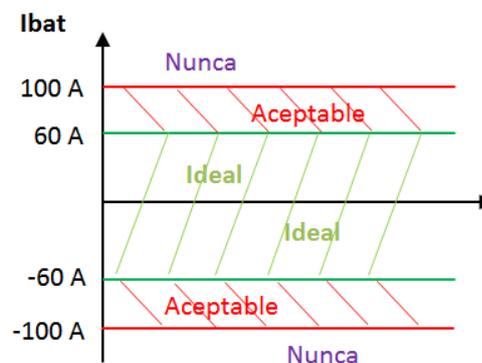


Figura 11. Corriente por las baterías para $I_{motor} \leq |60 A|$



El valor exacto del SOC de referencia dependerá de la velocidad y el Modo de Gestión (Normal, Deportivo, Escalada o Descenso) que estemos utilizando.

La corriente que se exige a las baterías para realizar estos ajustes del SOC del supercondensador es relativamente pequeña. Se puede seguir entregando simultáneamente la corriente media al motor (manteniendo la velocidad) sin afectar al rendimiento o vida útil de las baterías.

4. ACELERACIONES Y FRENADOS. LIMITACIÓN DE LA CORRIENTE POR LAS BATERÍAS

Todo lo explicado en el apartado 3 es utilizado para el programa de control exclusivamente cuando la velocidad se mantiene o va variando muy lentamente, actualizando de forma constante el SOC del supercondensador.

Sin embargo, cuando se realizan frenados o aceleraciones grandes, todo lo anterior deja de ser relevante para la señal de salida del sistema. En esos casos se prioriza una nueva corriente en el supercondensador (normalmente de valor alto), que aporta la diferencia existente entre el límite de intensidad de las baterías ($\pm 60\text{A}$) y la corriente del motor, consiguiendo así uno de nuestros principales objetivos: aumentar la vida útil de las baterías.

Para conseguir esto medimos la corriente del motor y la comparamos con los límites máximos y mínimos ideales que deberían existir en nuestras baterías (ecuación 11).

$$I_{\text{motor}} \leq |60 \text{ A}| \Rightarrow \text{No es necesario el AES} \quad (11)$$

Si la corriente es menor a 60 A absolutos significa que no están produciéndose aceleraciones y frenados importantes. La corriente por el supercondensador en este caso será baja, ajustando el valor del SOC en función de la velocidad y modo de gestión (como se explica en el apartado 3). Si no se cumple la condición de la Ecuación 11, solo existen dos opciones:

$$I_{\text{motor}} \geq 60 \text{ A} \Rightarrow \text{Aceleración o pendiente ascendente} \quad (12)$$

$$I_{\text{motor}} \leq -60 \text{ A} \Rightarrow \text{Frenado o pendiente descendente} \quad (13)$$



Ya sea necesario absorber energía (13) o aportarla (12), con el convertidor funcionado como reductor o elevador respectivamente, en cualquiera de los dos casos el supercondensador debe entrar en acción limitando la corriente sobre las baterías. La corriente de referencia anterior que ajustaba el SOC queda inutilizada, ya que las aceleraciones y frenados son prioritarios.

Como ya hemos comentado, el supercondensador se ha dimensionado para soportar los esfuerzos más habituales, ya que darle una mayor capacidad energética no saldría rentable. Nuestro sistema finalmente podía asumir los siguientes esfuerzos.

- Aceleraciones hasta 40-120 km/h.
- Pendientes abruptas de 50 m de altura.
- Pendientes moderadas (pendiente del 12%) de hasta 1,2 km de longitud manteniendo un velocidad constante de 50 km/h.

Seguramente existan situaciones excepcionales que acaben agotando el supercondensador. Como se ha decidido, cuando esto ocurra las prestaciones del vehículo no deben verse afectadas (no debe limitarse inesperadamente la potencia del motor), ya que esto podría afectar incluso a la seguridad vial.

Por lo tanto, según los esfuerzos vayan superando a los planteados, la corriente por las baterías superará proporcionalmente el límite fijado (80, 90 A y saltando hasta 200 A en el momento en que el supercondensador queda completamente descargado). Un ejemplo de esta problemática se estudia en el apartado 4.1.1 del anexo N°11, *Simulaciones y validación del algoritmo* (en la figura 18 de ese anexo se puede ver que la corriente evoluciona de la forma explicada).

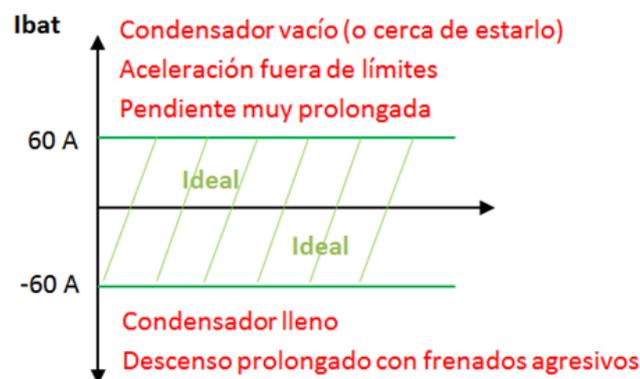


Figura 12. Corriente por las baterías para $I_{motor} \geq |60 A|$



Pese a que esto puede ser perjudicial, se tratan de situaciones excepcionales. Durante la mayor parte de las ocasiones la batería trabajará dentro de límites (60 A), por lo que la extensión de su vida útil con el sistema MES-AES estará garantizada.

Así pues, disponemos de dos corrientes de referencia diferentes, que trataremos de alcanzar utilizando las señales de control de los IGBT, mediante conmutación PWM y realimentación con un lazo de corriente:

- Una es la corriente que se exige al supercondensador para alcanzar su valor SOC de referencia, preparando al vehículo para la siguiente aceleración o frenado.
- La otra es la corriente que se exige al supercondensador para realizar las propias aceleraciones y frenados.

Estas dos corrientes no mandan señales dispares a los IGBT, ya que la segunda (para aceleraciones y frenados) tiene prioridad sobre la primera. Estas corrientes tienen diferentes valores pero normalmente no tienen sentidos opuestos. Son corrientes complementarias.

Por ejemplo, al realizar una aceleración se establece como prioridad aumentar la corriente en el AES y extraer la energía necesaria para apoyar a las baterías. Por otro lado, al aumentar la velocidad el SOC de referencia disminuye, por lo que se debe descargar el supercondensador, así que también se extraería corriente. Cuando la aceleración acaba, la corriente impuesta como prioritaria deja de actuar, se mide la velocidad y el estado de carga actual y se corrige la desviación con la corriente definida por el sistema no prioritario.



5. PROGRAMA DE CONTROL (PSIM)

A continuación iremos explicando las diferentes partes del programa de control, que se ha realizado con PSIM. Aunque se añaden algunas funciones adicionales, básicamente se trata de implementar lo explicado en los apartados anteriores,

En la Figura 13 podemos ver una imagen general del circuito. En la parte superior izquierda se encuentra el circuito de potencia (en rojo) del cual se toman las medidas necesarias para ejecutar el programa de control: intensidad del motor, supercondensador y baterías, tensión del supercondensador y baterías y velocidad (introducida mediante una función Step).

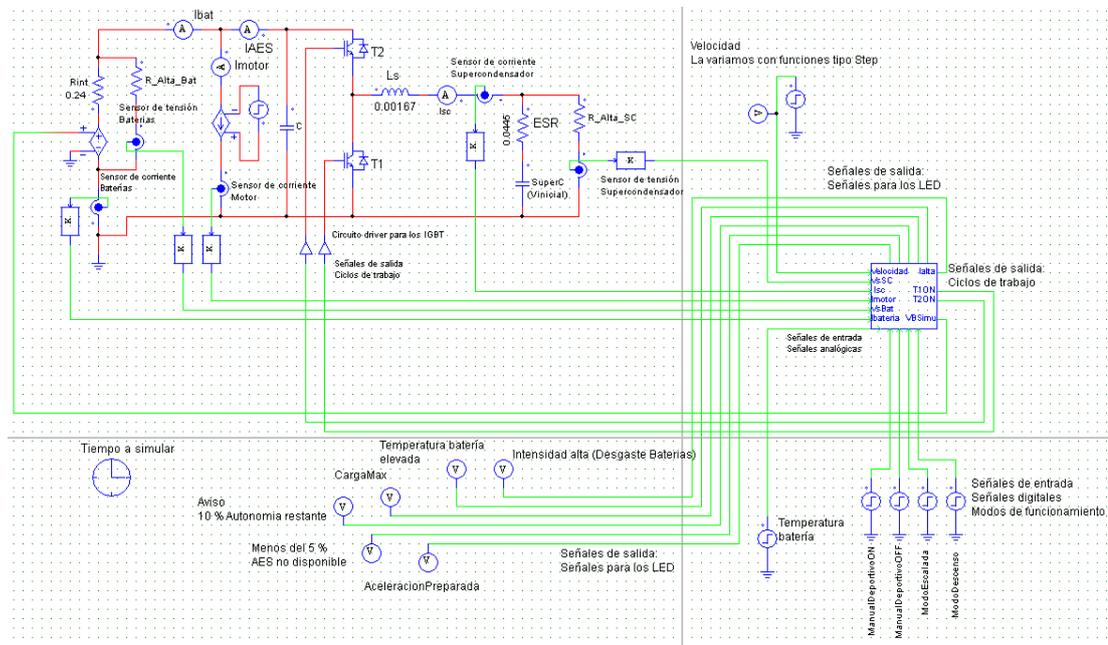


Figura 13. Esquema general del circuito de control realizado en PSIM

Esas variables se usan para conseguir el funcionamiento explicado, descargando y cargando el supercondensador según varía la velocidad y empleando su alta potencia específica para limitar la corriente por las baterías durante los frenados y aceleraciones. Las variables de salida son las señales PWM con las que controlamos a los IGBT (T1 y T2).

Asimismo, también podemos ver otras señales de salida informativas (se detallarán más adelante) y las señales de entrada que activan los diferentes modos de funcionamiento.



Dentro del bloque situado a la derecha de la Figura 13 se encuentra lo siguiente:

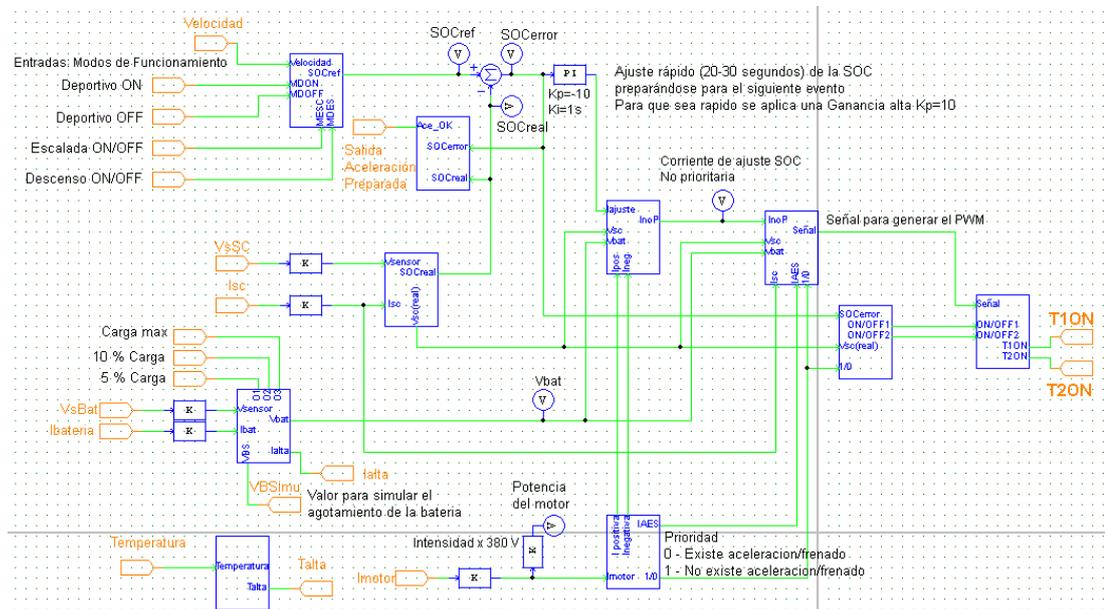


Figura 14. Programa de control. Visión general.

Para una mejor comprensión y desarrollo se ha dividido el programa en bloques con diferentes funciones. Primero explicaremos el bloque situado en la parte superior izquierda de la Figura 14.

Este bloque, visible en la Figura 15, tiene como entrada la Velocidad y los Modos de funcionamiento. En función de las entradas se obtiene el SOC de referencia, utilizando las ecuaciones 7, 8, 9 y 10 que aproximaban las curvas para cada Modo de Gestión del SOC (Normal, Deportivo, Escalada y Descenso en la Figura 10).

Posteriormente limitamos el SOC de referencia entre el 100 y 30 %, salvo para el Modo Escalada (abajo en la Figura 15), que lo limitamos entre el 100 y el 90 %, ya que las aproximaciones polinómicas utilizadas pueden dar valores que se encuentran ligeramente fuera de esos límites.

Además, introducimos las condiciones para activar o desactivar cada modo (según la Tabla 1). Tal como está diseñado el sistema de control no puede haber dos modos trabajando al mismo tiempo. Si no hay ningún modo conectado se utiliza por defecto el Modo Normal.

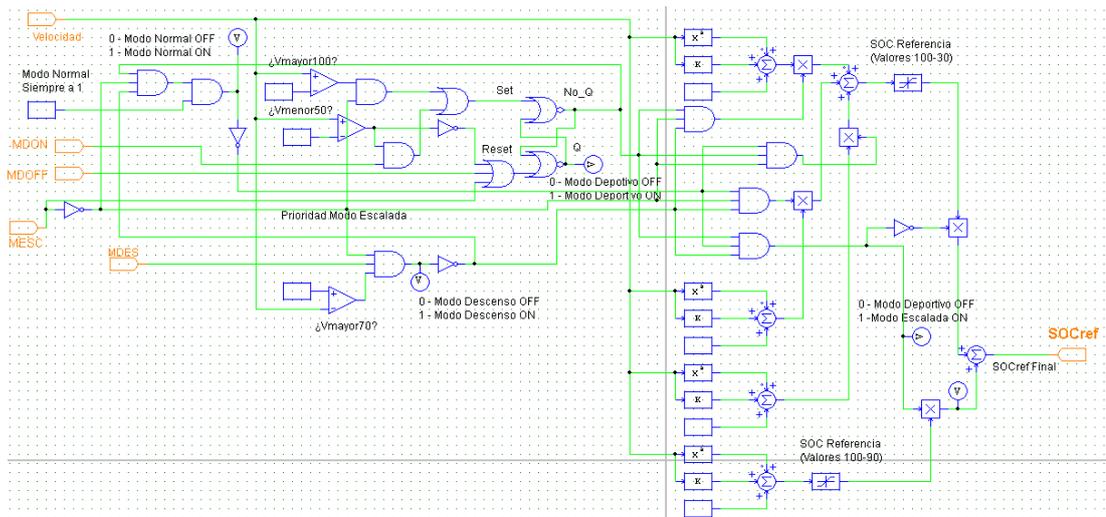


Figura 15. SOC_{ref} en función de la velocidad y el Modo de Gestión del SOC en actual funcionamiento

A continuación explicaremos el bloque situado en la parte inferior central de la Figura 14.

La función de este bloque es discriminar si la intensidad del motor es positiva o negativa y si es mayor a los límites establecidos (± 60 A). En caso afirmativo genera las señales que inutilizaran las corrientes de ajuste SOC y priorizaran las corrientes para aceleración o frenado del sistema AES, cuyos valores necesarios salen por la parte derecha de la Figura 16.

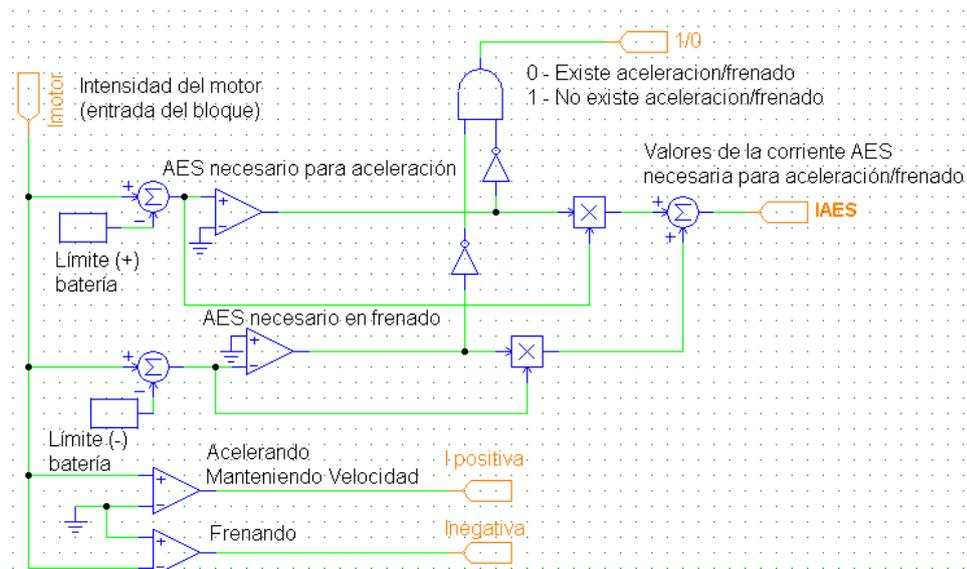


Figura 16. Bloque discriminador de la intensidad



El siguiente bloque (Figura 17) recibe el valor de tensión del sensor del supercondensador (V_{sensorSC}). De forma semejante a la Ecuación 6 obtenemos el SOC_{real} y lo proporcionamos sobre el 100 %, para compararlo con el SOC_{ref} que sale del bloque de la Figura 15.

Como el sensor de tensión mide también la caída de tensión interna (en la ESR) utilizamos el valor de la corriente del supercondensador (I_{SC}), para obtener el valor real de tensión en el interior del supercondensador.

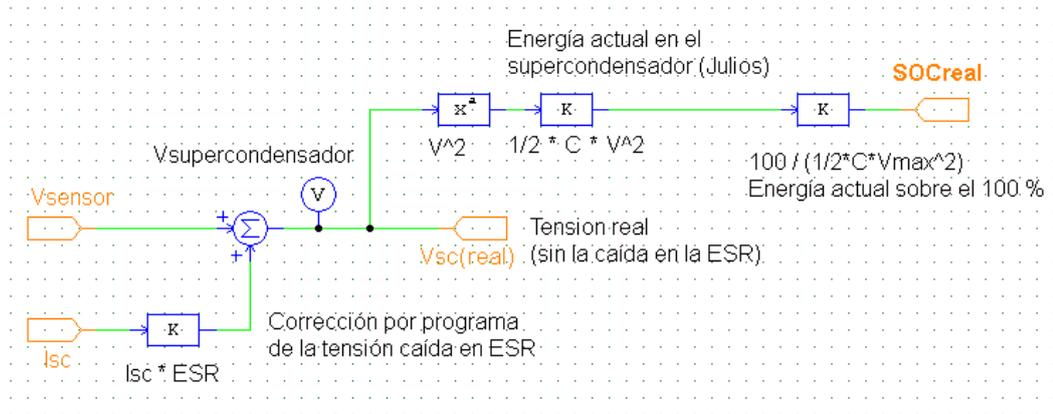


Figura 17. Obtención de $V_{\text{supercondensador}}$ y SOC_{real}

Tras comparar la diferencia entre el SOC de referencia y el real y amplificar el error (bloque PI de la Figura 14) obtenemos la corriente necesaria para realizar el ajuste, la cual se limita en el siguiente bloque (Figura 18) según lo explicado en el apartado 3.6. Se activa uno límite u otro si la corriente es negativa o positiva, empleando las señales de salida del bloque de la Figura 16.

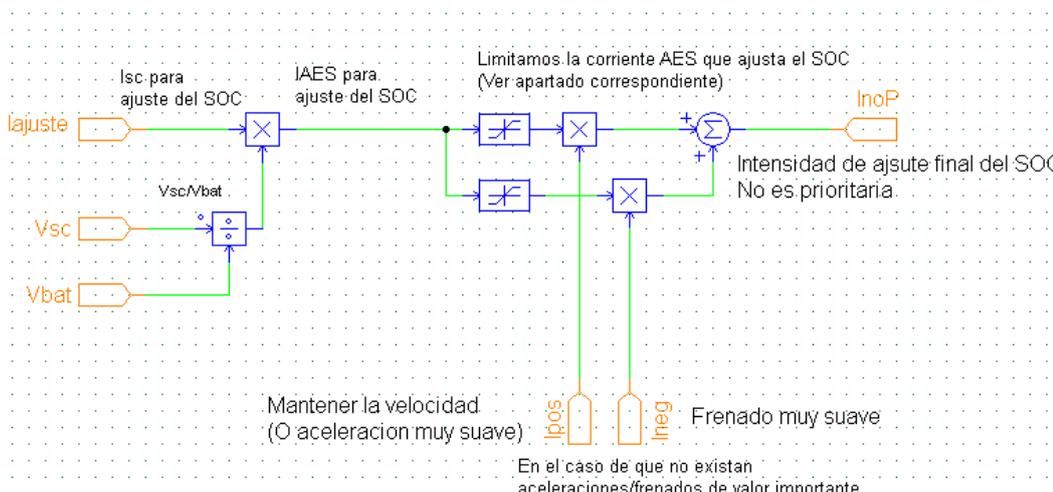


Figura 18. Generación del valor de corriente necesaria para ajustar el SOC de forma rápida



Si recordamos, el valor de corriente anterior (señal de salida de la Figura 18) no es prioritario. Cuando la corriente del motor es mayor de 60 A, el resultado de todo lo anterior se multiplica por cero (ver Figura 19), ya que el frenado y aceleración sí son prioritarios. Se prioriza entonces el valor de corriente necesario en el sistema AES para mantener las baterías en el límite ideal de 60 A.

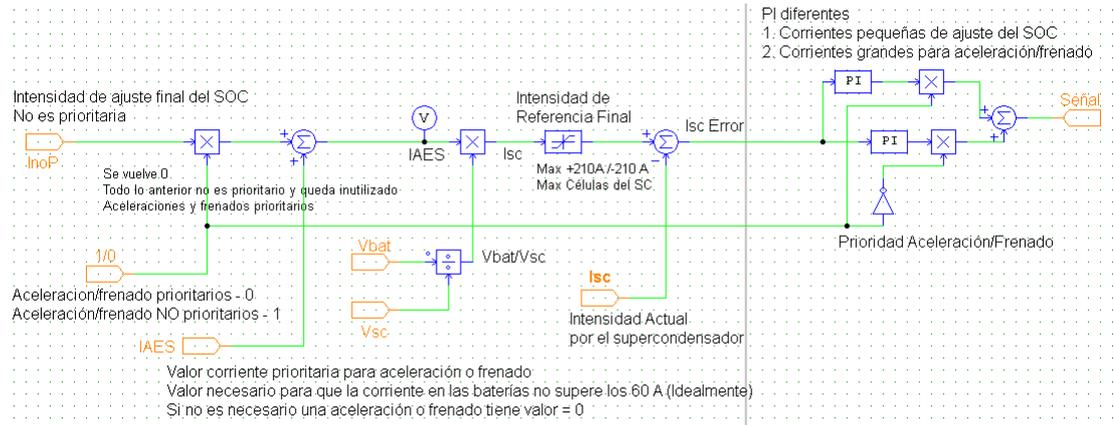


Figura 19. Generación de la señal de control mediante lazo de corriente. La corriente de referencia puede ser la prioritaria o no

Ahora explicaremos la necesidad de los bloques divisores de la Figura 18 y 19. La corriente por el motor (I_{motor}) es la suma de la corriente por la batería (I_{bat}) y la que sale del sistema AES (I_{AES}), que es sobre la que hemos marcado los límites en el apartado 3.6. Las diferentes corrientes pueden verse en la Figura 20.

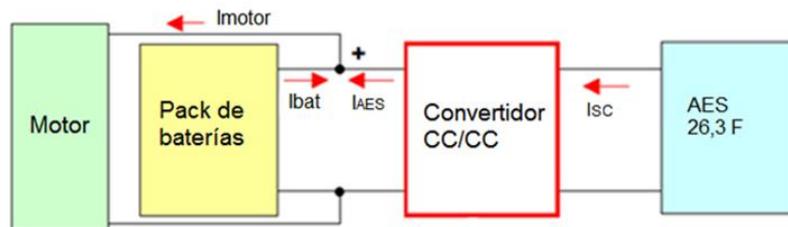


Figura 20. Corrientes del sistema MES-AES

Como la corriente se está midiendo en el supercondensador (I_{SC}), para realizar el programa de control necesitamos saber la relación entre ambas, la cual se muestra en la siguiente ecuación:

$$I_{AES} = I_{SC} \cdot \left(\frac{V_{cap}}{V_{Bat}} \right) \quad (14)$$

Se necesita un bloque divisor para poder comparar y limitar la I_{AES} y otro bloque más para deshacer la conversión y poder comparar y limitar la I_{SC} posteriormente.



La I_{SC} es limitada a la máxima corriente que soportan las células del supercondensador (210 A) y posteriormente la comparamos con la intensidad actual (ver Figura 19) realizando de esta forma la realimentación (regulación por lazo de corriente). La señal de error se utiliza en PI diferentes, dependiendo de si existen aceleraciones y frenados o no existen. La señal resultante se empleará para generar las señales de salida, que son los ciclos de trabajo de los IGBT.

En el siguiente bloque (Figura 21.a) las señales que van a los IGBT se inhiben para evitar que el supercondensador supere su nivel de tensión máxima o mínima de trabajo. Para evitar conmutaciones innecesarias en los IGBT y que la tensión del supercondensador este continuamente ajustándose ante variaciones de velocidad muy pequeñas el PWM se inhibe también cuando el $SOC_{error} = SOC_{ref} - SOC_{real} < 1\%$.

En la Figura 21.b se generan las señales PWM que se llevarán a los driver del módulo IGBT (señales T1 y T2). Las señales que ponen en funcionamiento a los IGBT se generan a partir de la señal de salida del bloque de la Figura 19 y se inhiben si se cumplen las condiciones del bloque de la Figura 21.a.

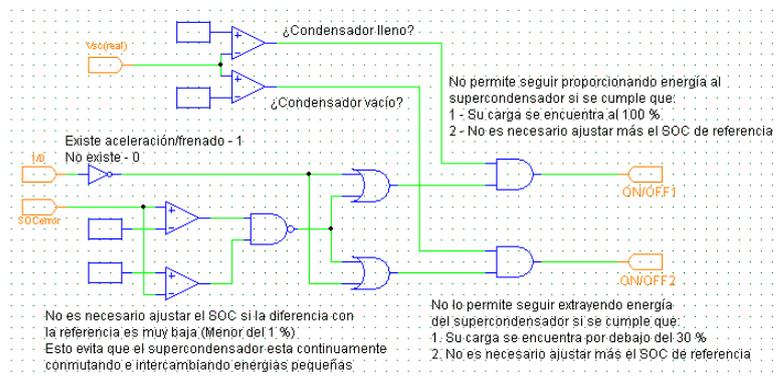


Figura 21.a. Bloque inhibidor de la puesta en conducción de los IGBT

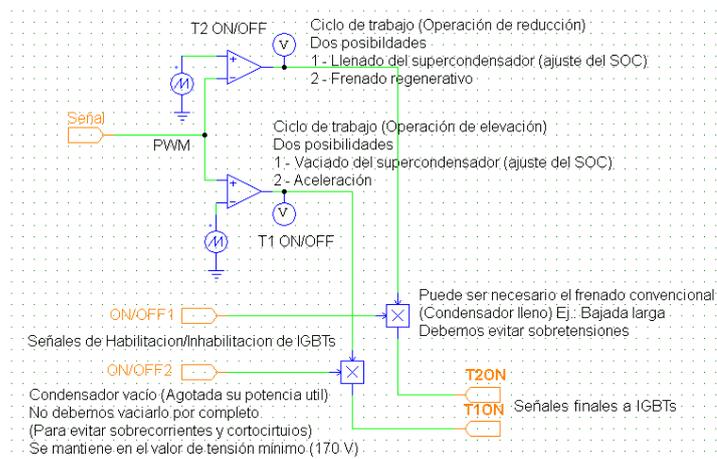


Figura 21.b. Generación de las señales PWM para T1 y T2



En la Figura 22 podemos ver el bloque que calcula la tensión actual en las baterías y su carga restante. La corriente por las baterías se emplea también para conocer la caída de tensión en la resistencia interna (R_{int}) y poder obtener su fuerza electromotriz a partir de la tensión en bornes (que es la que mide nuestro sensor).

Asimismo, la corriente que circula por las baterías se emplea para conocer su estado de carga actual. Sabemos que nuestras baterías tienen una capacidad total de 66 Ah (apartado 2 del anexo N°8, *Desarrollo del Sistema de Potencia*).

Nosotros solo tenemos que medir el valor de la corriente (20, 40, 60 A, etc.) y el tiempo que se mantiene cada valor (incluyendo si son valores negativos, lo que indica que las baterías se recargan), para lo que se utiliza un bloque integrador. De esta forma sabemos que cuando quedan 66 Ah el SOC será del 100 % y cuando quedan 0 Ah el SOC será del 0 %.

Con esos resultados se puede informar al usuario de la autonomía restante del vehículo, así como activar las correspondientes señales de salida que nos avisan de que nos acercamos al límite de autonomía.

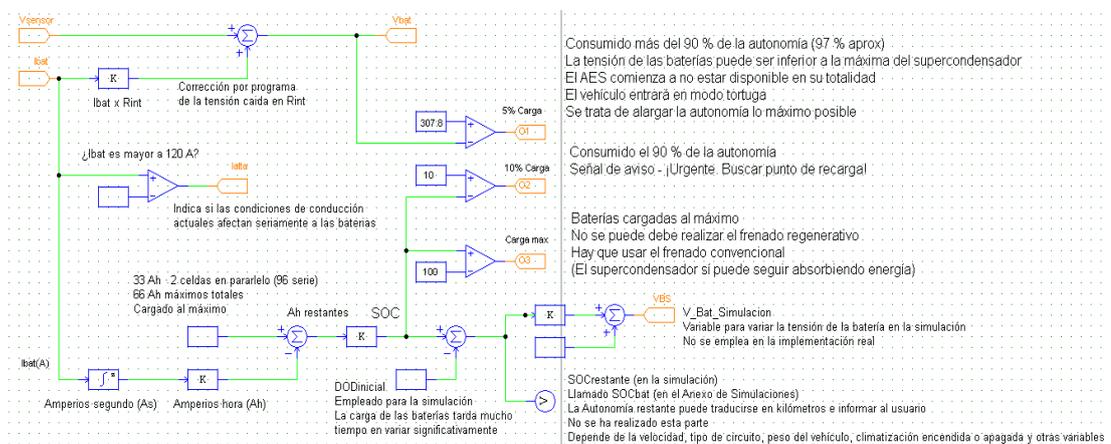


Figura 22. Bloque que calcula la tensión de las baterías y su carga restante

Hemos incluido un bloque para variar el DOD inicial de nuestra batería y poder estudiar y simular situaciones en que las baterías están muy descargadas. De esta forma podemos variar el estado de carga inicial de las baterías a nuestro antojo, sin tener que simular decenas de kilómetros para que su carga se reduzca sensiblemente.

Asimismo hemos incluido un variable de salida para que la tensión de la batería varíe en función del estado de carga. La variación de la tensión de las baterías según su



estado de carga se ha aproximado mediante una recta. Esto es posible ya que su tensión varía de forma aproximadamente lineal, siempre que trabajemos en rangos del 100 al 10 % del SOC de la batería. Los datos de la recta han sido tomados de la curva de descarga de las células del paquete de baterías (Figura 23).

Si recordamos el anexo N°8, *Desarrollo del Sistema de Potencia*, nuestra batería trabaja normalmente en valores inferiores a 1C (30 A), ya que posee 96 células en serie y 2 en paralelo, garantizando así una larga vida útil para las baterías.

$$V_{100\%} = 96 \cdot 4,2 \text{ V} \approx 400 \text{ V} \quad (15.1)$$

$$V_{10\%} = 96 \cdot 3,5 \text{ V} \approx 336 \text{ V} \quad (15.2)$$

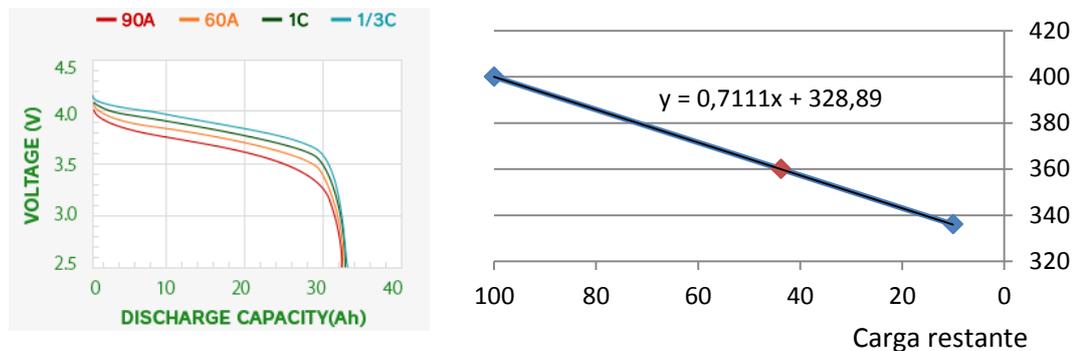


Figura 23. Variación de la tensión de las baterías según su descarga. El valor de 360 V corresponde a la tensión nominal dada por el fabricante (cerca a un 50 % de la carga)

El circuito de potencia dentro del programa de control queda de la siguiente forma:

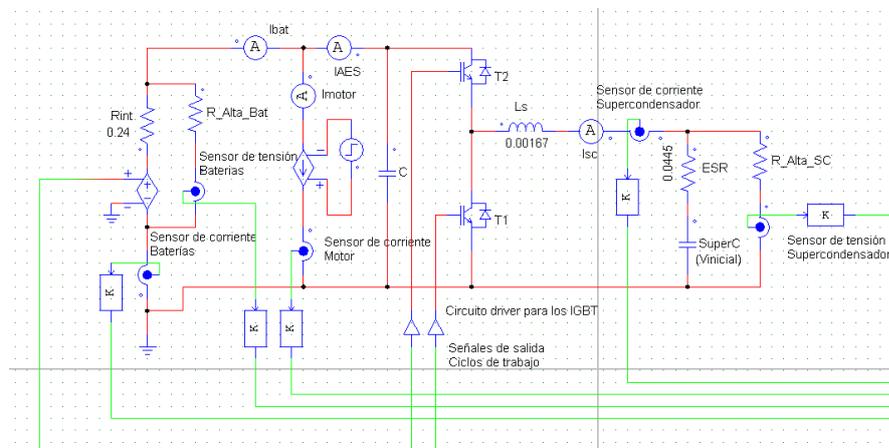


Figura 24. Circuito de potencia y parte del circuito de control. Posición de los sensores y variables para la simulación



En la Figura 24 podemos ver la localización de los sensores de corriente y tensión (la tensión se mide también a través de la intensidad que hacemos circular por una resistencia de valor alto). Los sensores se han intentado aproximar lo más posible a su localización y estructura real. En el interior de los sensores se encuentran configuradas las ganancias de los diferentes circuitos de acondicionamiento, que ajustan las medidas al rango de entrada del conversor A/D. Para más detalles sobre las mediciones consultar el anexo N°13, *Circuitos de acondicionamiento y control*.

En la parte izquierda de la Figura 14 pueden verse unos bloques en los que se introduce una ganancia (K) para transformar la tensión de entrada del conversor al valor real, para poder trabajar con los valores del circuito a escala real.

Asimismo, a lo largo de todo el circuito se han colocado amperímetros, voltímetros y elementos necesarios para obtener los resultados que se reflejan en el Anexo *Simulaciones y validación del algoritmo*. No debe confundirse a estos elementos (I_{bat} , I_{AES} , etc.) que se utilizan en la simulación con los sensores que toman las medidas y las conducen al bloque de control (visible en la parte derecha de la Figura 13).

5.1 Otras entradas y salidas

En la Figura 13 pueden verse otras entradas y salidas. Además de las entradas analógicas mencionadas, existen 4 entradas digitales:

- Conexión del Modo Escalada
- Conexión del Modo Descenso
- Conexión del Modo Deportivo.
- Desconexión del Modo Deportivo

El Modo Normal entra en funcionamiento en ausencia de los anteriores.

Además de las salidas T1 y T2 que serán utilizadas para controlar los semiconductores se han dispuesto una serie de salidas digitales para proporcionar mayor información al usuario. Estas salidas encienden un LED en el panel de instrumentos del vehículo cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Baterías cargadas al máximo. Normalmente esta señal se encuentra activa tras realizar una recarga completa.



- 10 % de autonomía restante. Esta señal nos advierte de que deberíamos ir buscando un punto de recarga.
- 5 % de autonomía restante. A partir de este punto la tensión mínima de las baterías cae por debajo de la tensión máxima del supercondensador, por lo que el sistema AES comienza a no estar disponible en su totalidad.

Los fabricantes suelen limitar la velocidad de sus vehículos eléctricos a partir de estos niveles de descarga (modo tortuga), tratando de extender al máximo la autonomía restante para que el usuario alcance un punto de recarga. No se ha diseñado esa funcionalidad. Otras señales de salida de nuestro sistema no relacionadas con el estado de carga son:

- Intensidad alta en las baterías.

Esta señal se activa cuando la intensidad en las baterías supera por un cierto margen los valores considerados como aceptables. Hemos decidido que la señal se active a partir de 120 A (ver Figura 22). Esto puede darse en casos excepcionales como aceleraciones agresivas o pendientes muy prolongadas. Si se enciende en condiciones normales indicaría al usuario que debe ir a revisar su vehículo, ya que existe algún problema de funcionamiento (ej.: se han averiado algunas células del supercondensador, o existe algún problema en el sistema de control).

- Temperatura alta en la batería

Esta señal se activa cuando la temperatura en la batería supera un valor dado (en este caso se ha fijado 70°C). Si las baterías se sobrecalientan indicaría nuevamente al usuario la existencia de algún problema en su vehículo (ej.: algunas células de la batería están dañadas, conviene recambiarlas antes de que se produzcan daños en el resto).

El rango de medida de la temperatura de nuestro sensor va desde -50°C a 150°C. Para convertir la entrada analógica de la temperatura a grados centígrados y compararla con el límite establecido se emplea el bloque de la Figura 25, cuya posición dentro del programa puede revisarse en la Figura 14 anterior. Para más detalles sobre esta y otras medidas ver el anexo N°13, *Circuitos de Acondicionamiento y control*.

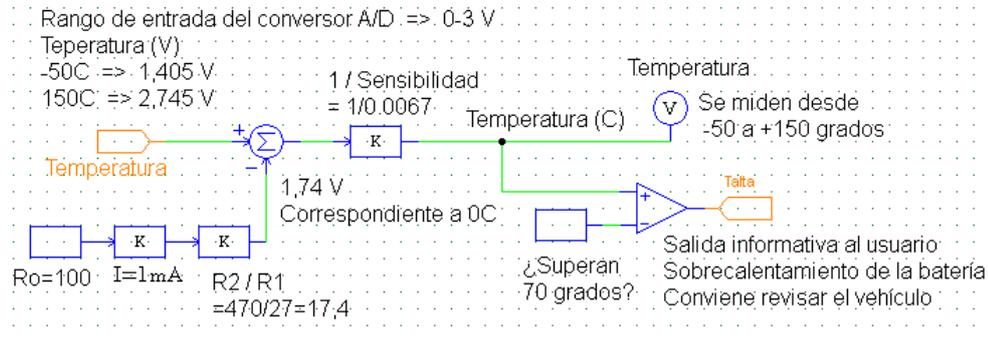


Figura 25. Bloque de cálculo y supervisión de la temperatura

- Vehículo preparado para acelerar.

Esta señal se activa cuando el estado de carga del supercondensador es suficiente para realizar un esfuerzo importante. Para ello se ha considerado que el SOC debe ser al menos superior al 45 % y no estar a más de un 10 % por debajo de la referencia, como se ve en la Figura 26.

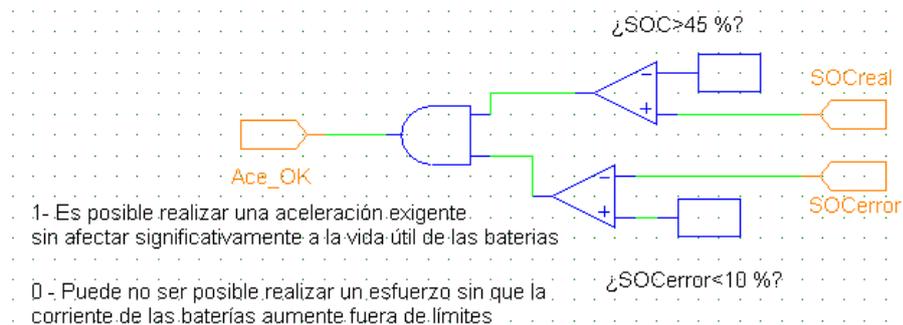


Figura 26. Vehículo preparado para acelerar. Generación de la señal

Para saber más acerca de estas señales, su necesidad y comprobar todo el funcionamiento del algoritmo de control desarrollado consultar el siguiente anexo, *Simulaciones y validación del algoritmo*.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Regenerative Braking for an Electric Vehicle Using Ultracapacitors and a Buck-Boost Converter. Juan W. Dixon, Micah Ortúzar and Eduardo Wiechmann*Department of Electrical Engineering, Catholic University of Chile.
*University of Concepción

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ANEXO N°11

APLICACIÓN PRÁCTICA:

SIMULACIONES Y VALIDACIÓN DEL ALGORITMO

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.	SIMULACIONES EN ENTORNO NO URBANO	4
2.1.	Aceleración. Velocidad media-alta	4
2.2.	Frenado. Velocidad alta-media.....	9
3.	SIMULACIONES EN ENTORNO URBANO	13
3.1.	Aceleración en entorno urbano.....	13
3.2.	Frenado en entorno urbano.....	16
4.	MODO DE GESTIÓN SOC ALTERNATIVOS.....	19
4.1.	Modo deportivo. Simulaciones	19
4.1.1.	Aceleración a altas velocidades. Limitaciones del Modo Normal.....	19
4.1.2.	Modo Deportivo. Tiempo para su preparación	23
4.1.3.	Simulación del modo deportivo.....	24
4.2.	Modo Escalada. Simulaciones.....	27
4.2.1.	Pendientes prolongadas. Limitaciones del modo normal.....	27
4.2.2.	Simulación del modo escalada.....	30
4.3.	Modo Descenso. Simulaciones	32
4.3.1.	Descensos prolongados. Limitaciones del Modo Normal.....	32
4.3.2.	Simulación del Modo Descenso	35
5.	CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN DE LOS DIFERENTES MODOS.....	38
5.1.	Conexión y desconexión del Modo Deportivo.....	38
5.2.	Conexión y desconexión del Modo Escalada	38
5.3.	Conexión y desconexión del Modo Descenso.....	40
6.	EMISIONES ELECTROMAGNÉTICAS.....	40
7.	RENDIMIENTO DEL SISTEMA.....	42
8.	CONCLUSIONES.....	43



1. INTRODUCCIÓN

En el anterior anexo, *Desarrollo del algoritmo de control*, hemos explicado el sistema de control realizado en PSIM. A continuación vamos a simular el comportamiento del sistema MES-AES ante diferentes situaciones de conducción.

Para una mejor comprensión de las simulaciones se han elaborado unas tablas con los valores del SOC de referencia para cada uno de los modos de funcionamiento y otra tabla para la tensión del supercondensador correspondiente a cada estado de carga (SOC) anterior. También hemos elaborado una tercera tabla, que corresponde a la potencia y corriente que debe desarrollar el motor para mantener diferentes velocidades, considerando un terreno aproximadamente llano.

Tabla 1. Estado de carga (SOC) del supercondensador en función de la velocidad y el Modo de Gestión del SOC

Velocidad (km/h)	Estado de carga (SOC) del supercondensador (en %)			
	Modo Normal	Modo Deportivo	Modo Escalada	Modo Descenso
0	100	(100)*	100	90
5	98,6	(100)	100	88
10	97,7	(100)	100	86
15	96,3	(100)	100	83
20	93,9	(100)	100	79
25	92,1	(100)	99	75
30	89,7	(100)	98	71
35	87,4	(100)	96,5	67
40	84,1	(100)	94	63
45	81,8	(100)	92	58
50	79	100	90	53
55	74,8	98	90	48
60	70,6	96	90	42
65	66	94	90	35
70	61	91	90	30
75	55	87	90	(30)
80	50	83	90	(30)
85	45	78	90	(30)
90	40	71	90	(30)
95	34	64	90	(30)
100	30	58	90	(30)
105	(30)	50	90	(30)
110	(30)	40	90	(30)
115	(30)	33	90	(30)
120	(30)	30	90	(30)

*Los valores marcados entre paréntesis corresponden a estados desconectados



Tabla 2. Tensión del supercondensador (en V) correspondiente al SOC de la Tabla 1

Velocidad (km/h)	Tensión correspondiente al SOC del supercondensador (V)			
	Modo Normal	Modo Deportivo	Modo Escalada	Modo Descenso
0	307,8	(307,8)*	307,8	292,0
5	305,6	(307,8)	307,8	288,7
10	304,2	(307,8)	307,8	285,4
15	302,0	(307,8)	307,8	280,4
20	298,3	(307,8)	307,8	273,6
25	295,3	(307,8)	306,3	266,6
30	291,6	(307,8)	304,7	259,4
35	287,8	(307,8)	302,4	251,9
40	282,3	(307,8)	298,4	244,3
45	278,4	(307,8)	295,2	234,4
50	273,6	307,8	292,0	224,1
55	266,2	304,7	292,0	213,3
60	258,6	301,6	292,0	199,5
65	250,1	298,4	292,0	182,1
70	240,4	293,6	292,0	170
75	228,3	287,1	292,0	(170)
80	217,6	280,4	292,0	(170)
85	206,5	271,8	292,0	(170)
90	194,7	259,4	292,0	(170)
95	179,5	246,2	292,0	(170)
100	170	234,4	292,0	(170)
105	(170)	217,6	292,0	(170)
110	(170)	194,7	292,0	(170)
115	(170)	176,8	292,0	(170)
120	(170)	170	292,0	(170)

*Los valores marcados entre paréntesis corresponden a estados desconectados

Tabla 3. Potencia y corriente necesaria en el motor para mantener diferentes velocidades (Vehículo masa=1400kg)

Velocidad (km/h)	Rodadura (CV)	Aerodinámica (CV)	Potencia aprox. (kW)	Imotor aprox. (A)
40	5,5	1	4,5	11,8
50	5,5	2	6	15,8
70	5,5	5,5	8	21,0
80	5,5	8,2	10	26,3
90	5,5	11,7	13	34,1
100	5,5	16	16	42,0
120	5,5	27,6	24	63,0
Potencia máxima		75 kW		
Corriente máxima		197 A		



2. SIMULACIONES EN ENTORNO NO URBANO

Las primeras simulaciones las realizaremos poniendo al vehículo en condiciones no urbanas. Los esfuerzos serán superiores a los que se producen en ciudad.

El principal objetivo del sistema de potencia y control del MES-AES desarrollado en este proyecto es impedir que la corriente por las baterías alcance grandes valores (menos de 60 A idealmente y hasta 100 A como máximo), consiguiendo alargar la vida útil de las costosas baterías de litio y mejorando la eficiencia y el rango de autonomía a largo plazo del vehículo.

El convenio de signos utilizado en las simulaciones es el siguiente:

- Corriente positiva en baterías y supercondensadores \Rightarrow Aportan energía
- Corriente negativa en baterías y supercondensadores \Rightarrow Absorben energía
- Corriente positiva en el motor \Rightarrow Aceleración / Ascenso / Mantener la marcha
- Corriente negativa en el motor \Rightarrow Frenado / Descenso

2.1. Aceleración. Velocidad media-alta

En el apartado 1.1.1 del anexo N°5, *Estudio Justificativo de la Solución Adoptada*, se realizó el siguiente cálculo:

- Masa del vehículo: 1400 kg
- Rendimiento: 80 %
- Aceleración: 40-100 km/h en 7 segundos.
- Tensión de las baterías: 360 V.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Corriente de 225 A. Este valor acortaba la vida útil de las baterías.
- Se requería una potencia de 81 kW.

En nuestro caso, el motor es de 75 kW, pero como el rendimiento será mayor gracias al sistema MES-AES (ej.: 90 %) hemos estimado que también podemos realizar esa aceleración en 7 segundos.



Para comprobar cómo funciona nuestro sistema y estudiar que sucede con la corriente por las baterías y el resto de parámetros realizamos una simulación. Ya que se trata de la primera simulación, la explicaremos en más detalle. Los datos de entrada para ejecutar la simulación son los siguientes:

1. Tensión y estado de carga de las baterías

La tensión de nuestra batería va desde los 400 V máximos hasta los 336 V mínimos. Nosotros realizaremos la simulación con los 360 V, el mismo valor con el que se realizó el cálculo anterior. Esta tensión corresponde a una carga del 43,75 % (en la simulación introducimos que la batería tiene una descarga inicial del 56,25 %).

2. Velocidad del vehículo

Le vamos a exigir la misma aceleración que en el cálculo realizado. Para ello comenzaremos a una velocidad de 40 km/h y haremos que esta sea de 100 km/h en 7 segundos. Llevado a un caso práctico sería como realizar la incorporación a una autovía.

Haremos que la velocidad varíe linealmente. En realidad, el par no es constante con la velocidad (en azul en la Figura 1), por lo que esta variación de velocidad no sería lineal. Sin embargo, los resultados de la corriente sobre baterías y supercondensadores no se verían afectados por este hecho, ya que la potencia que desarrolla un motor eléctrico sí es constante a partir de un cierto punto (en rojo en la Figura 1).

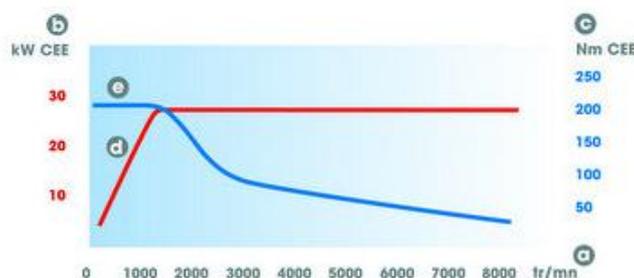


Figura 1. Motor eléctrico, potencia en kW (rojo) y par en Nm (azul)

3. Potencia del vehículo (consultar la Tabla 3)

Durante la aceleración el motor desarrolla la potencia máxima de 75 kW (197 A) y cuando alcance una velocidad estable esta se reducirá. Es importante recordar que



mantener una velocidad alta conlleva una mayor carga aerodinámica (proporcional al cubo de la velocidad). Redondeando, se ha calculado que para mantener la marcha de un vehículo de 1400 kg a 100 km/h son necesarios 15 kW (40 A).

4. Tensión en el supercondensador (consultar la Tabla 1 y 2)

En este caso suponemos que hemos circulado a 40 km/h durante mucho tiempo y que se ha alcanzado el valor de tensión de referencia a esa velocidad. En este caso utilizaremos el funcionamiento en Modo Normal. Por lo tanto iniciaremos la simulación con 283 V (84 % de la SOC).

Introducimos los valores y realizamos la simulación. Primero comprobamos si los datos de entrada (velocidad y potencia) han variado correctamente.

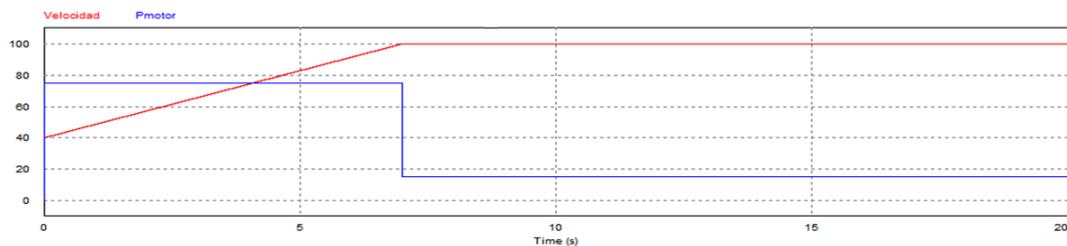


Figura 2. Velocidad (km/h) y Potencia (kW). Aceleración 40-100 km/h en 7 segundos

En la Figura 2 podemos ver como la potencia y velocidad varían como hemos indicado. Se ha supuesto un terreno llano, la misma variación de velocidad no requerirá tanta potencia en una pendiente moderadamente descendente y en una pendiente ascendente tardaría más tiempo (ya que la potencia del motor ya es máxima y no puede aumentar más).

A continuación vamos a estudiar que ha sucedido con el resto de variables. Empezaremos con las corrientes:

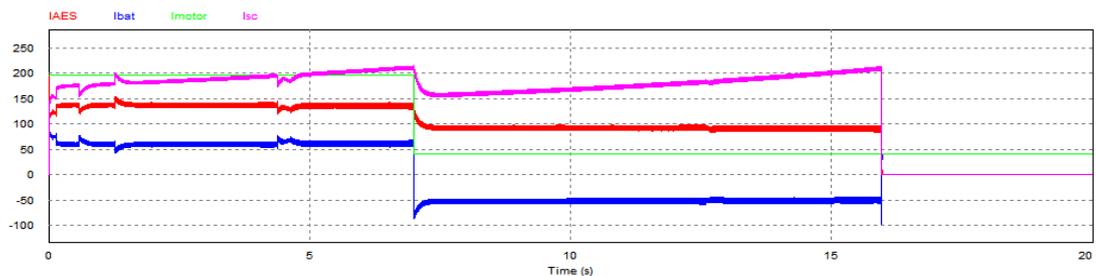


Figura 3. Corriente del supercondensador (I_{sc}), de salida del convertidor (I_{AES}), de la batería (I_{bat}) y corriente exigida por el motor (I_{motor})



En la Figura 3 la corriente del motor durante la aceleración son 197 A (correspondientes a 75 kW) y en $t=7s$ baja a 40 A (15 kW). Durante la aceleración la batería no proporciona más de 60 A, cumpliéndose nuestro objetivo. El supercondensador no supera los 210 A máximos que puede proporcionar y a través del convertidor CC-CC en modo elevador aporta el resto de la corriente, como se ve en la ecuación 1.

$$I_{motor} = I_{AES} + I_{bat} \Rightarrow I_{AES} = I_{sc} \left(\frac{V_{sc}}{V_{bat}} \right) = 197 - 60 = 137 \text{ A} \quad (1)$$

En la Figura 3 podemos ver cómo mientras la corriente del motor (I_{motor}) sea constante, la corriente de salida del convertidor CC-CC (I_{AES}) para apoyar a las baterías es también constante. Sin embargo, la corriente por el supercondensador I_{sc} sí que va aumentando, ya que I_{sc} depende de su tensión V_{sc} (Ecuación 1).

Posteriormente, en $t=7s$ cuando la aceleración termina nos encontramos a 100 km/h. En ese punto, la referencia SOC del supercondensador en Modo Normal es del 30 % (ver Figura 4), que es la cifra en que lo consideramos descargado y preparado para absorber un frenado.

El supercondensador ha sido dimensionado para que realice las aceleraciones de forma óptima entre el 100 % y el 50 % de su carga, ya que es en esas condiciones cuando proporciona mayor potencia. Además, como hemos preparado el supercondensador para aceleraciones mayores, su carga real ha bajado de un 84 % inicial hasta un 55 % durante los 7 segundos de aceleración. Por lo tanto, debe seguir descargándose hasta el 30 %, lo que se conseguirá entorno a $t=16s$ (ver Figura 4).

Esta energía que descarga el supercondensador se usa para mover al motor. La energía sobrante se desvía a las baterías, recargándolas ligeramente, por eso su corriente es negativa desde $t=7s$ hasta $t=16s$ (su corriente es negativa en la Figura 3). A partir de $t=16s$, el supercondensador deja de descargarse, por lo que las baterías vuelven a ser las encargadas de mantener la velocidad (su corriente se vuelve positiva, tramo final de la Figura 3).

En $t=7s$ se alcanzan los 100 km/h, por lo que el SOC de referencia del supercondensador alcanza el 30 %. Como la descarga real depende de la demanda del motor y la corriente que pueden absorber las baterías, la curva del SOC real es más lenta y tarda un tiempo en alcanzar la referencia (ver Figura 4).

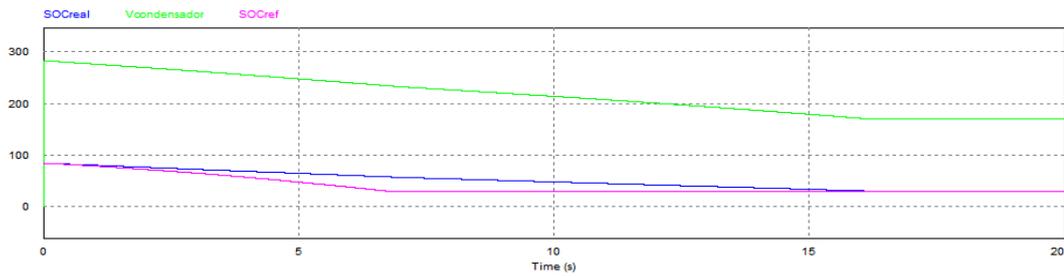


Figura 4. Estado de carga real (SOC_{real}), estado de carga de referencia ($SOC_{referencia}$) y tensión en el supercondensador ($V_{condensador}$)

En la Figura 4 al inicio la tensión es de 283 V (si se revisan las Tablas 1 y 2 es la correspondiente a 40 km/h y un 84 % del SOC). El valor de 283 V permite absorber un frenado a velocidad baja, pero está principalmente preparado para acelerar, como es el caso. En $t=16s$ la tensión alcanza los 170 V (la correspondiente a 100 km/h o más y un 30 % del SOC), un valor preparado exclusivamente para realizar frenados.

Como se ha visto, el sistema regula correctamente la tensión del supercondensador, preparándolo para una nueva aceleración o frenado. Alcanzar el valor de referencia le lleva en torno a 20 segundos (en los peores casos), pero tampoco conlleva ningún problema si no se ha alcanzado a tiempo la referencia por completo. En este caso, si frenamos con un valor de 200 V tampoco habría ningún inconveniente importante para absorber la energía. (Además, en condiciones de conducción normal los vehículos no están acelerando y frenando de forma concatenada y continua).

Otro dato que puede resultarnos interesante es la evolución del estado de carga de la batería (Figura 5).

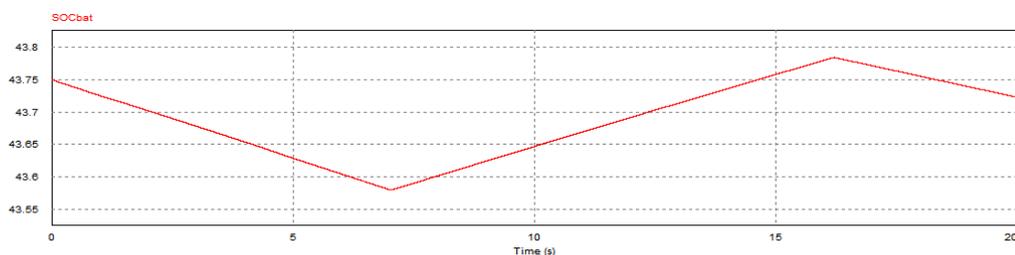


Figura 5. Estado de carga de la batería (SOC_{bat})

La tensión inicial en las baterías es de 360 V, con la que hemos realizado la simulación y que corresponde a un SOC del 43,75 %. Durante la aceleración su carga se reduce lentamente (un 0,15 % en la Figura 5), ya que tendríamos que simular mucho tiempo (varios kilómetros) para que se notase una pérdida importante de carga.



Cuando alcanzamos la velocidad de 100 km/h en $t=7s$, el supercondensador se descarga para alcanzar su referencia del 30 % a 100 km/h. Desde $t=7s$ hasta $t=16s$ el supercondensador se encarga de mantener la velocidad a la vez que recarga levemente las baterías.

Una vez el supercondensador termina de descargarse y alcanza los 170 V (tensión de referencia a 100 km/h) su corriente I_{sc} en la Figura 3 se vuelve 0 A (en $t=16s$), el sistema AES deja de aportar energía $I_{AES} = 0 A$ y la batería vuelve a ser la encargada de mantener la velocidad $I_{bat} = 40 A$, por lo que su corriente se vuelve positiva y su carga total vuelve a reducirse de forma lenta, al final de la Figura 5.

➤ **Aceleración. Análisis de resultados de la simulación**

Se han alcanzado las prestaciones de aceleración planteadas manteniendo nuestro principal objetivo: reducir la corriente por las baterías para alargar su vida útil. Frente a los 225 A en el sistema sin supercondensador (ver anexo N°3), en nuestro sistema MES-AES la corriente de las baterías se ha reducido hasta los 60 A.

2.2. Frenado. Velocidad alta-media.

En el apartado 1.1.3 del anexo N°3, *Estudio Justificativo de la Solución Adoptada*, se realizó el siguiente cálculo:

- Masa del vehículo: 1400 kg
- Rendimiento: 80 %
- Frenado: 100-50 km/h en 6 segundos.
- Tensión de las baterías: 360 V.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Corriente de -150 A que cargaba las baterías durante el frenado. Este valor es demasiado alto y acorta la vida útil de las baterías a largo plazo.
- Se requería una potencia de -54 kW.

Como el rendimiento del sistema MES-AES es más alto podremos absorber algo más de energía (-61 kW frente a los -54kW anteriores). Los datos de partida de la simulación son los siguientes:



1. Tensión y estado de carga de las baterías.

Vamos a colocar las baterías al mismo nivel anterior, 360 V y SOC del 43,75 %.

2. Velocidad del vehículo

Vamos a frenar de 100 a 50 km/h en 6 segundos. Este es un frenado moderado, no un frenado de emergencia. Variaremos la velocidad de forma lineal, igual que en el caso anterior, ya que la forma exacta en que varía la velocidad no es demasiado relevante para los resultados.

3. Potencia del vehículo (Tabla 3)

Hemos calculado que se necesitará una potencia de -61 kW (regenerativa) para realizar ese frenado en 6 segundos. Esa potencia corresponden a -160 A en el motor.

Cuando alcancemos los 50 km/h dejaremos de regenerar energía para comenzar a consumirla para mantener la velocidad. A 50 km/h la carga aerodinámica es menor y un vehículo de 1400 kg necesitará de solo 6 kW para mantener la marcha (15 A en el motor).

4. Tensión en el supercondensador (Tabla 1 y 2)

En este caso suponemos que llevamos circulando a 100 km/h durante mucho tiempo y que se ha alcanzado el valor de tensión de referencia a esa velocidad. En este caso utilizaremos el funcionamiento en Modo Normal. Por lo tanto iniciaremos la simulación con 170 V (el 30 % del SOC).

Introducimos los valores y realizamos la simulación. Primero comprobamos si los datos de entrada (velocidad y potencia) han variado correctamente en la Figura 6.

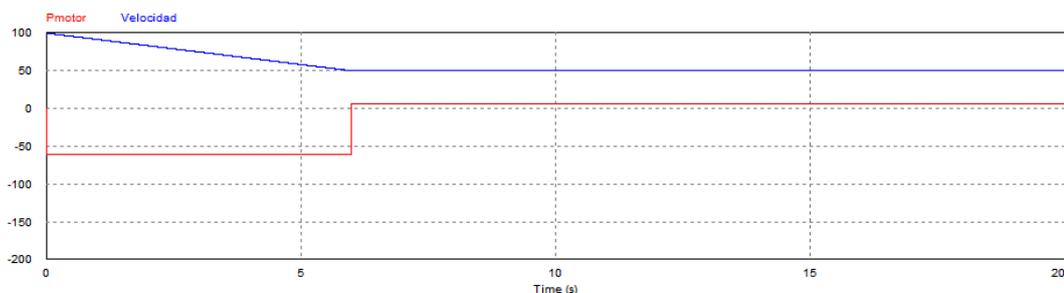


Figura 6. Velocidad (km/h) y Potencia (kW). Frenado 100-50 km/h en 6 segundos



En la Figura 7 comprobamos que la corriente por las baterías se ha limitado correctamente a -60 A, absorbiendo el resto del frenado mediante el sistema AES. Al principio vemos como la corriente I_{AES} es algo superior. Es por esta razón y con el objetivo de evitar sobrecorrientes por lo que el supercondensador no debe bajar nunca de 170 V (lo que dejaba un 30 % de su capacidad energética sin utilizar, pero pudiendo regenerar mediante frenados el restante 70 %).

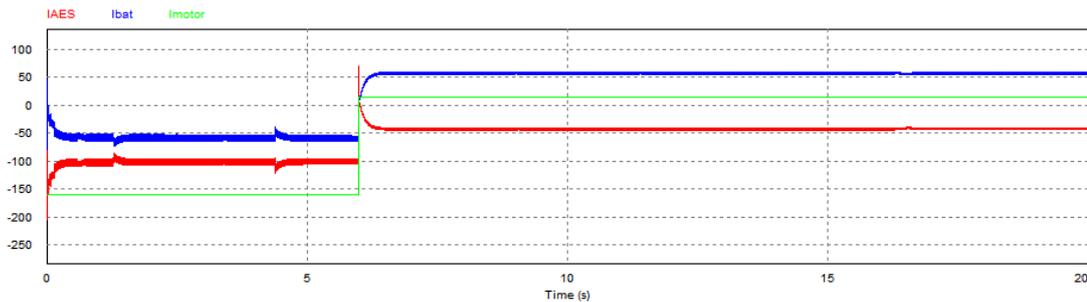


Figura 7. Corriente de salida del convertidor (I_{AES}), de la batería (I_{bat}) y motor (I_{motor})

Una vez realizado el frenado (a partir de $t=6s$) la batería pasa de absorber energía a proporcionársela al supercondensador, ya que debemos prepararlo para el caso de que deseásemos acelerar posteriormente. La batería es capaz de mantener la marcha a la vez que se carga el supercondensador, sin que todo ello aumente demasiado los valores de corriente que debe soportar (en este caso I_{bat} no supera 50 A).

Como se puede ver en la Figura 8, llevar el valor de tensión del supercondensador hasta la referencia necesaria para poder acelerar posteriormente puede llevar bastante tiempo (unos 40 segundos como máximo, se simuló para comprobarlo).

El frenado lleva el SOC del supercondensador del 30 al 50 %. El SOC de referencia en Modo Normal a 50 km/h es del 79% (274 V, tablas 1 y 2). Debido a que la batería también debe mantener la velocidad a la vez que carga el supercondensador, para no desgastar la batería nos hemos visto obligados a que el supercondensador se cargue a un ritmo lento (a un máximo de 40 A, limitado por nuestro sistema de control).

Debido a esto, el sistema tarda un tiempo en recuperar la carga y en poder realizar una nueva aceleración a plena potencia del supercondensador. Al final de esta simulación explicaremos porqué este resultado puede considerarse aceptable.

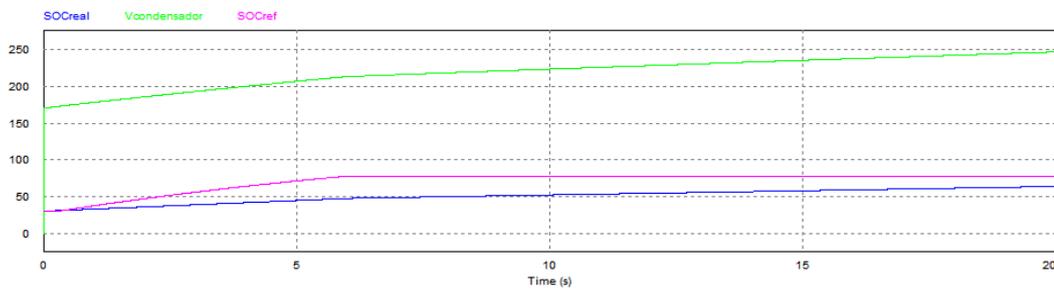


Figura 8. Estado de carga real (SOC_{real}), estado de carga de referencia (SOC_{ref}) y tensión en el supercondensador ($V_{condensador}$)

Estudiando la simulación, el frenado regenerativo ha servido para:

1. Aumentar el SOC del supercondensador del 30 al 50 % aproximadamente, como puede verse en la Figura 7. El resto de energía hasta al 79 % va a ser entregado lentamente por la batería.

El hecho de que la batería deba cargar el supercondensador no debe verse como un gasto energético, ya que posteriormente utilizaremos toda esa energía para una aceleración y el sobrante se devolverá nuevamente a la batería (sin apenas pérdidas), como podía verse en la Figura 5 de la simulación anterior.

2. Aumentar el SOC de la batería del 43,75 % al 43,9 %, como puede verse en la Figura 9.

De todo esto puede deducirse la importancia del frenado regenerativo para incrementar la eficiencia y extender la autonomía.

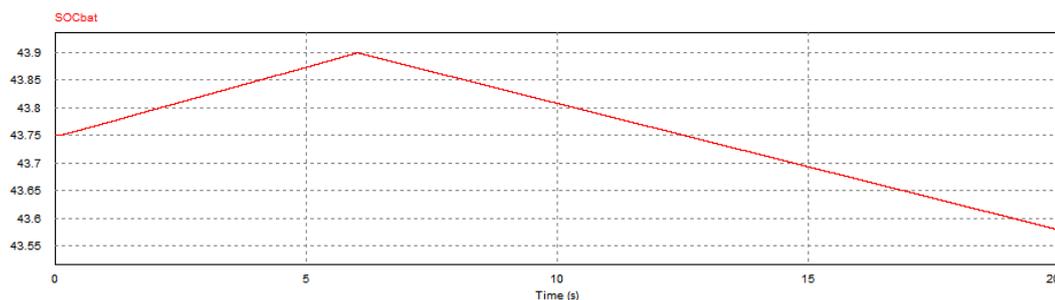


Figura 9. Estado de carga de la batería (SOC_{bat})

En la segunda parte de la Figura 9, podemos ver cómo tras el frenado la batería sigue descargándose lentamente para mantener la velocidad y continuar cargando el supercondensador.



➤ **Frenado. Análisis de resultados de la simulación**

El sistema MES-AES es capaz de absorber toda la energía del frenado, repartiéndola entre baterías y supercondensadores, sin causar ningún desgaste en las primeras.

El sistema tarda un tiempo (hasta 40 segundos) en estar preparado para realizar una nueva aceleración con todo su potencial. Ya que suponemos que no vamos a estar acelerando y frenando constantemente, se puede considerar un resultado medianamente aceptable. Además, no es necesario alcanzar el SOC de referencia del supercondensador (del 79 % en este caso) para conseguir una aceleración capaz de ponernos nuevamente a 100 km/h. Así que realmente podría acelerarse casi de forma inmediata sin que esto supusiese grandes efectos negativos en las baterías.

A continuación realizaremos simulaciones en un entorno urbano. En ciudad las variaciones del SOC de referencia son menores, por lo que el valor de referencia tarda menos en alcanzarse y la problemática es menor.

Por último, no realizaremos la simulación de un frenado de emergencia, ya que ni las baterías ni el motor ni siquiera el supercondensador están preparados para absorber tanta energía en tan poco tiempo (- 600 A y -216 kW, calculado en el apartado 1.1.3 del anexo N°3, *Estudio Justificativo de la Solución Adoptada*). Por este motivo el frenado de emergencia debe realizarse disipando la energía mediante el frenado convencional, priorizando la seguridad y no la regeneración de energía.

3. SIMULACIONES EN ENTORNO URBANO

A continuación realizaremos las simulaciones en el entorno urbano, que es el entorno ideal y más apropiado para el vehículo eléctrico. A priori podemos afirmar que los esfuerzos eléctricos sobre los elementos serán inferiores a los de las simulaciones anteriores.

3.1. Aceleración en entorno urbano

Los datos de partida para la aceleración en entorno urbano serán los siguientes, siguiendo el mismo procedimiento que en las anteriores simulaciones:



1. Tensión y estado de carga de las baterías

El esfuerzo en la aceleración va a ser menor. Para complicarle un poco la aceleración al sistema MES-AES, vamos a situar la tensión de las baterías a su nivel mínimo de 336 V, correspondiente a un estado de carga del 10% (DOD del 90 %). No vamos a simular el sistema con una carga menor.

Esta situación se daría tras realizar un viaje largo. Si queremos evitar quedarnos sin energía deberíamos estar buscando un punto de recarga o a poca distancia de nuestro lugar de estacionamiento habitual (con sistema para la recarga instalado).

2. Velocidad del vehículo

Vamos a acelerar de 0 a 50 km/h (ej.: tras detenernos en un semáforo). Con la potencia máxima de nuestro motor (75 kW) este esfuerzo se realiza en unos 2,5 segundos. Sin embargo, en la simulación nosotros tardaremos 4 segundos, ya que la potencia real del motor no alcanza la máxima a muy bajas revoluciones.

3. Potencia del vehículo (Tabla 3)

Volveremos a utilizar los 197 A en la aceleración (75 kW) y los 15 A (6 kW) para mantener la velocidad a 50 km/h.

4. Tensión en el supercondensador (Tabla 1 y 2)

Suponemos que llevamos detenidos (en el semáforo) el tiempo suficiente como para que el supercondensador haya alcanzado la tensión de referencia. A 0 km/h la referencia SOC en Modo Normal es del 100 %, correspondientes a 307,8 V (valor máximo de tensión nominal).

Introducimos los valores y realizamos la simulación. Primero comprobamos si los datos de entrada (velocidad y potencia) han variado correctamente en la Figura 10.

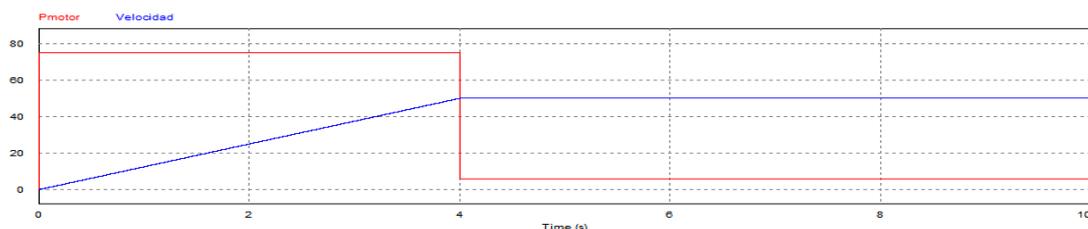


Figura 10. Velocidad (km/h) y Potencia (kW). Aceleración 0-50 km/h en 4 segundos



En la Figura 11 vemos como durante la aceleración (0-4 segundos) la corriente por las baterías se mantiene en 60 A. La corriente requerida al supercondensador es menor que en los casos anteriores, ya que está cargado al máximo. Cuando la aceleración termina, parte de la energía del supercondensador continúa descargándose moviendo el motor y recargando las baterías, como sucedía en la simulación del apartado 2.1.

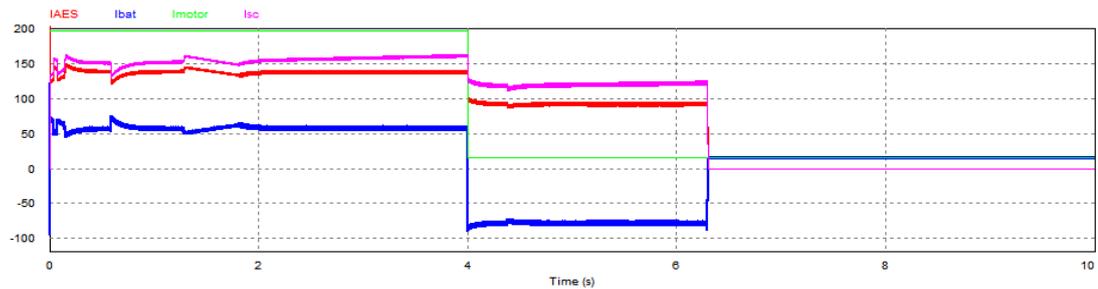


Figura 11. Corriente del supercondensador (I_{SC}), de salida del convertidor (I_{AES}), de la batería (I_{bat}) y corriente exigida por el motor (I_{motor})

En este caso las baterías sufren una corriente regenerativa de -80 A (de $t=4s$ a $t=7s$). Supera el límite ideal de los 60 A, aunque se mantiene dentro de los límites aceptables de 100 A. Al final de esta simulación explicaremos la razón de este valor.

Como podemos observar en la Figura 12, el SOC de referencia se alcanza en $t=7s$, en ese momento la corriente de las baterías en la Figura 11 pasa a ser positiva (15 A para mantener la velocidad) y el supercondensador deja de descargarse ($I_{SC} = 0$).

Cuando el vehículo estaba detenido el SOC de referencia era del 100 % (307,8 V). A 50 km/h el SOC de referencia es del 79 %, lo que corresponde a una tensión 274 V (ver Tabla 1 y 2). La diferencia entre el SOC correspondiente a la velocidad inicial y final es menor que a velocidades mayores (comparar Figura 12 y 4). Como la diferencia es menor, la referencia tarda menos en alcanzarse.

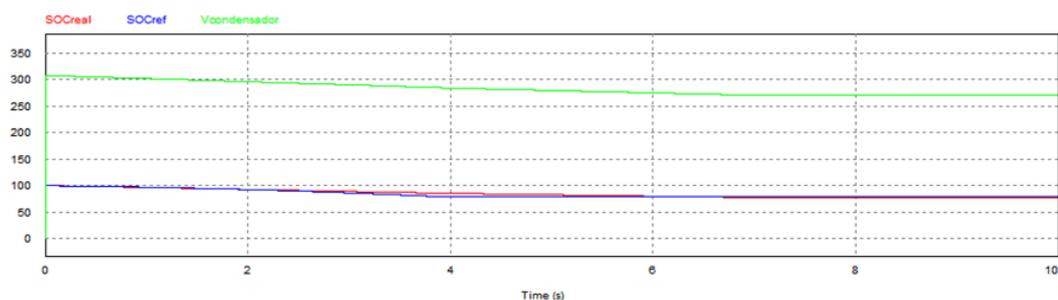


Figura 12. Estado de carga real (SOC_{real}), estado de carga de referencia (SOC_{ref}) y tensión en el supercondensador ($V_{condensador}$)



En esta simulación la carga inicial de las baterías era del 10 %. Al acelerar a 50 km/h esta se reduce (hasta $t=4$ segundos), al descargar el supercondensador sobre las baterías aumenta (hasta $t=7$ s) y para seguir manteniendo la velocidad vuelve a reducirse lentamente, como puede verse en la Figura 13.

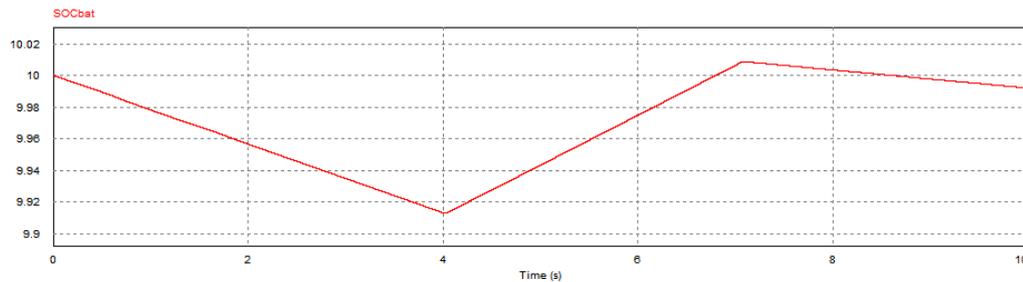


Figura 13. Estado de carga de la batería (SOC_{bat})

➤ Aceleración en entorno urbano. Análisis de resultados

Como vemos en la Figura 11, la corriente por las baterías supera durante un tiempo los 60 A ideales, sin sobrepasar los 100 A que consideramos aceptables. Debemos permitir que la corriente se salga de los límites ideales para que el supercondensador alcance rápidamente la referencia en cualquier tipo de situación. En este caso solo tarda 3 segundos (de $t=4$ s hasta $t=7$ s, Figura 11) pero en el apartado 2.1 le llevaba 9 segundos (de $t=7$ s hasta $t=16$ s, Figura 4) y en el apartado 2.2 podía tardar hasta un total de 40 segundos.

De esta forma, permitiendo una corriente ligeramente superior (hasta 100 A) en algunos casos y solo durante un pocos segundos conseguimos que el supercondensador se prepare más rápido para realizar aceleraciones y frenados, estando siempre disponible para estos esfuerzos.

Así pues, el sistema funciona de forma correcta al arrancar y acelerar en entorno urbano. La velocidad con la que se alcanza el SOC de referencia del supercondensador permite realizar varias aceleraciones y frenados consecutivos, acciones que son frecuentes en un ambiente de ciudad.

3.2. Frenado en entorno urbano

Los datos de partida para la simulación del frenado en un entorno urbano serán los siguientes.



1. Tensión y estado de carga de las baterías.

El esfuerzo en el frenado va a ser menor que a velocidades altas. Para complicárselo un poco al sistema vamos a situar la tensión de las baterías cerca del nivel máximo.

La tensión de las baterías será de 390 V, lo que corresponde a un 86 % de la carga (en la simulación introducimos un 14 % de DOD). En la práctica, esta situación se daría poco después de realizar la recarga de las baterías.

2. Velocidad del vehículo

Vamos a frenar de 50 a 0 km/h en 3 segundos. Este tiempo está contado desde que el conductor pisa el freno (su tiempo de reacción no influye en la simulación). Al igual que en los casos anteriores, haremos que varíe de forma lineal.

3. Potencia del vehículo (Tabla 3)

Para realizar este pequeño frenado (50-0 km/h en 3 segundos) calculamos que se producirá una potencia de -40 kW (una corriente de -105 A en el motor). Cuando nos detengamos (0 km/h) la corriente necesaria en el motor será mínima.

4. Tensión en el supercondensador (Tabla 1 y 2)

Suponemos que llevamos circulando a 50 km/h durante el tiempo suficiente para haber alcanzado los valores de referencia: 79 % del SOC y 274 V. Estos valores coinciden con los valores finales de la anterior simulación (Figura 12).

Introducimos los valores y realizamos la simulación. Comprobamos que la velocidad y potencia por el motor han variado correctamente.

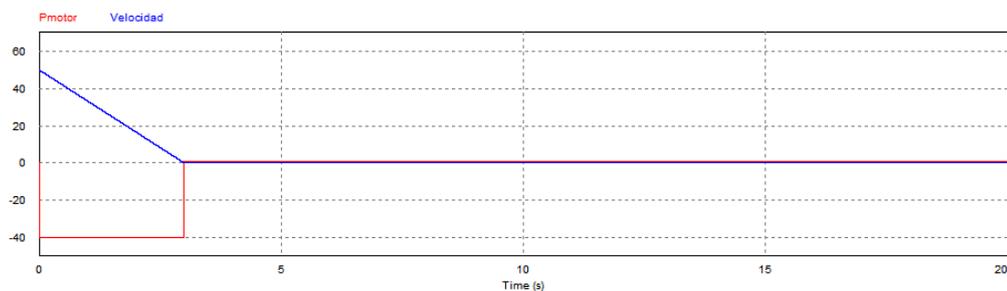


Figura 14. Velocidad (km/h) y Potencia (kW). Frenado 50-0 km/h en 3 segundos



Durante los 3 segundos del frenado, el supercondensador y las baterías absorben energía (Figura 15). Como después nos encontramos parados, las baterías siguen trabajando para cargar el supercondensador al máximo, aunque el motor no esté exigiendo corriente (desde $t=3s$ hasta $t=15s$). A partir de $t=15s$ el sistema está esperando el momento del arranque, sin que el supercondensador o las baterías aporten ninguna energía.

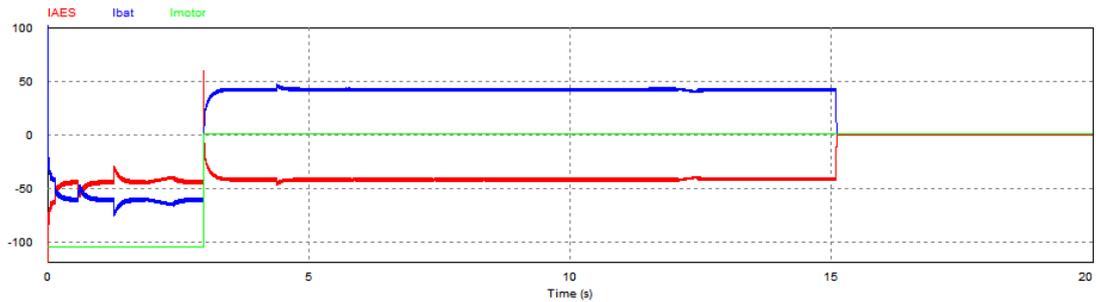


Figura 15. Corriente del salida del convertidor (I_{AES}), de la batería (I_{bat}) y motor (I_{motor})

En la Figura 16 podemos comprobar como efectivamente en $t=15s$ se alcanza la referencia de 0 km/h del supercondensador, correspondiente a 307,8 V (100 % de SOC, Tablas 1 y 2).

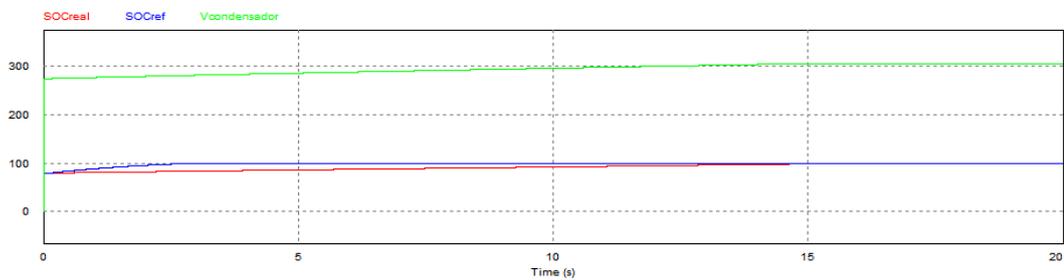


Figura 16. Estado de carga real (SOC_{real}), estado de carga de referencia (SOC_{ref}) y tensión en el supercondensador ($V_{condensador}$)

En la figura 17 vemos como las baterías absorben energía durante el frenado (hasta $t=3s$), cargan el supercondensador al máximo para la aceleración (hasta $t=15s$) y mantienen su valor con el vehículo parado ($t=15s$ en adelante).

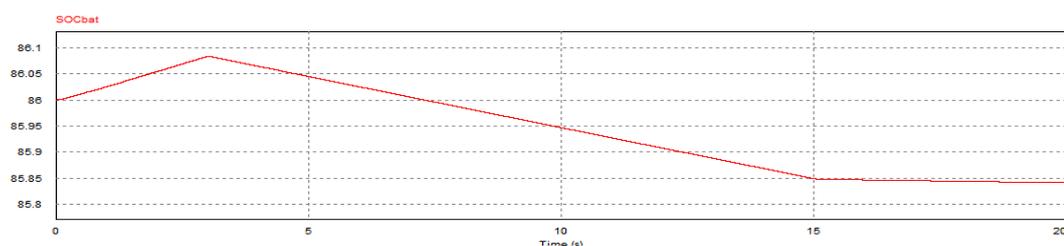


Figura 17. Estado de carga de la batería (SOC_{bat})



➤ **Frenado en entorno urbano. Análisis de resultados**

El frenado se realiza de forma correcta. La corriente se mantiene dentro de los valores considerados, aun cuando la tensión de las baterías es considerablemente superior a la del supercondensador.

Estudiando el tiempo que tarda en alcanzarse el SOC de referencia en las simulaciones anteriores, podemos concluir que el sistema tarda más en prepararse para realizar una aceleración (tarda más tiempo en cargar el supercondensador) que en prepararse para absorber un frenado (tarda menos tiempo en descargar el supercondensador). El tiempo necesario para preparar el supercondensador es mayor a velocidades mayores, ya que el SOC varía en mayor medida en ese rango.

4. MODO DE GESTIÓN SOC ALTERNATIVOS

Hemos realizado las simulaciones en el Modo Normal de gestión del SOC, que es el modo más versátil, útil para entorno urbano y también capaz de alcanzar velocidades considerablemente altas. Sin embargo, este modo no funciona correctamente en algunos casos, para los que hemos implementado unos modos de funcionamiento alternativo.

Así pues, primero estudiaremos en qué casos el Modo Normal resulta inadecuado y cómo cada uno de los modos alternativos es capaz de mejorar el sistema, realizando una simulación que lo verifique.

4.1. Modo deportivo. Simulaciones

Empezaremos por el Modo Deportivo de gestión del SOC. Primero se estudiará su necesidad, justificándola a partir de una simulación de un caso concreto del Modo Normal. Posteriormente se ejecutará la misma simulación con el Modo Deportivo, donde podremos evaluar el grado de mejoría.

4.1.1. Aceleración a altas velocidades. Limitaciones del Modo Normal

En la simulación del apartado 2.1 hemos comprobado que el sistema es capaz de acelerar de 40 a 100 km/h en 7 segundos sin problemas (incluso podría alcanzar



mayor velocidad). Esto es gracias a que a 40 km/h el supercondensador se encuentra prácticamente cargado (al 84 %) y preparado para acelerar.

Sin embargo, una vez alcanzada una velocidad alta, el supercondensador está descargado (30 %, nunca permitimos que baje de ese nivel, ver Tabla 1) y preparado para recibir un frenado. Por este motivo, en el Modo Normal el sistema tiene problemas para acelerar en una segunda ocasión (ej.: de 100 a 120 km/h).

Para comprobarlo vamos a situar las baterías en su tensión media de 360 V. Realizaremos la aceleración 90-120 km/h de forma lineal en 5 segundos. Para ello la potencia del motor será máxima (75 kW, 197 A) durante la aceleración y seguirá siendo medianamente alta (24 kW, 60 A) para mantener los 120 km/h, ya que la carga aerodinámica aumenta. El SOC del supercondensador a 90 km/h estará cerca del mínimo (195 V correspondientes al 40 %).

Cuando el supercondensador está cargado al máximo, las potencias que se desarrollaban eran las siguientes:

$$P_{SC-m\acute{a}x} = I_{m\acute{a}x} \cdot V_{m\acute{a}x} = 210 \text{ A} \cdot 307,8 \text{ V} = 64,6 \text{ kW} \quad (2.1)$$

$$P_{Media-Bater\acute{i}as} = I_{l\acute{i}mite} \cdot V_{media} = 60 \text{ A} \cdot 360 \text{ V} = 21,6 \text{ kW} \quad (2.2)$$

$$P_{SC-m\acute{a}x} + P_{Media-Bater\acute{i}as} = 86,2 \text{ kW} > P_{Motor} = 75 \text{ kW} \quad (2.3)$$

Según la Ecuación 2.3, para alcanzar los 75 kW del motor, el supercondensador cargada al máximo tiene potencia más que suficiente.

Sin embargo, con una tensión inicial de 195 V, la potencia del supercondensador se ve reducida. Para evitar dañarlo tenemos que limitar su corriente al máximo que soportan sus células en serie (210 A). El resultado es el siguiente:

$$P_{SC-reducida} = 210 \text{ A} \cdot 195 \text{ V} = 41 \text{ kW} \quad (2.4)$$

$$P_{SC-reducida} + P_{Media-Bater\acute{i}as} = 62,6 \text{ kW} < P_{Motor} = 75 \text{ kW} \quad (2.5)$$

Por lo tanto, según la Ecuación 2.5, si no queremos limitar al motor, las baterías tienen que aportar la potencia restante y su corriente alcanza los 100 A, como se puede ver a principio de la Figura 18.



Estos valores de 100 A no son los valores ideales (por debajo de 60 A) pero se han considerado aceptables, ya que se dan en pocas ocasiones (ej.: no se daban en la aceleración realizada en el apartado 2.1). Sin embargo, a partir de $t=3s$, mientras se está realizando la aceleración (dura un total de 5 segundos), el supercondensador alcanza su valor mínimo (ver Figura 20) y deja de aportar energía ($I_{SC} = 0$, ver Figura 18). Durante estos instantes (desde $t=3s$ hasta $t=5s$) las baterías son las encargadas de proporcionar toda la corriente al motor, alcanzando valores de 200 A. Como hemos explicado, este hecho es indeseable, ya que acorta la vida útil de las baterías.

Posteriormente vemos como a los 5 segundos la aceleración acaba y los valores de la corriente vuelven a los límites normales.

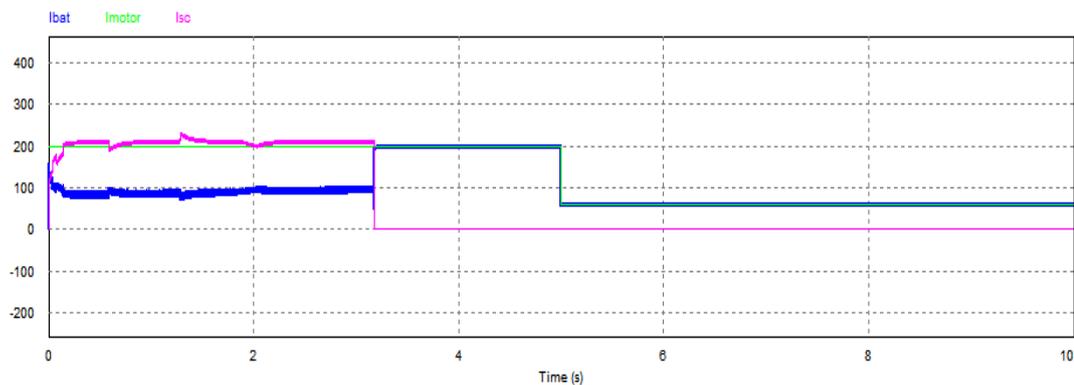


Figura 18. Corriente del supercondensador (I_{SC}), de la batería (I_{bat}) y motor (I_{motor})

En el programa hemos incluido una señal que nos indica cuando la corriente de las baterías supera los 120 A. Si esta situación se vuelve demasiado frecuente provocará una disminución de vida útil de las baterías. En este caso las baterías sufren ese desgaste entre $t=3s$ y $t=5s$, como se ve en la Figura 19.

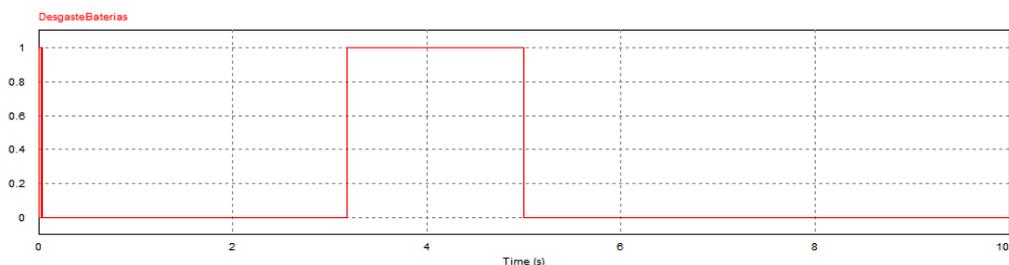


Figura 19. Tiempo durante el que la corriente por las baterías afecta gravemente a su vida útil ($I_{bat} > 120 A$)



El Modo Deportivo se conecta automáticamente a partir de 100 km/h (en $t=1,7s$ en la Figura 20), pero como inicialmente no estaba conectado (en 90 km/h estaba apagado) el SOC real del supercondensador no estaba preparado para la aceleración, por lo que las baterías han sufrido una corriente indeseada.

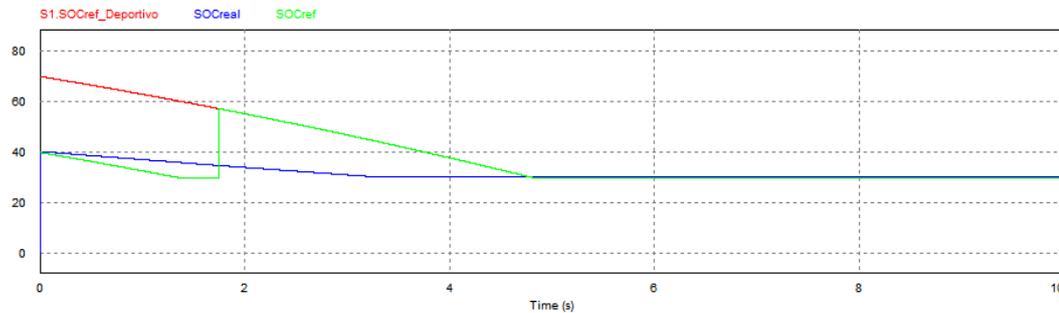
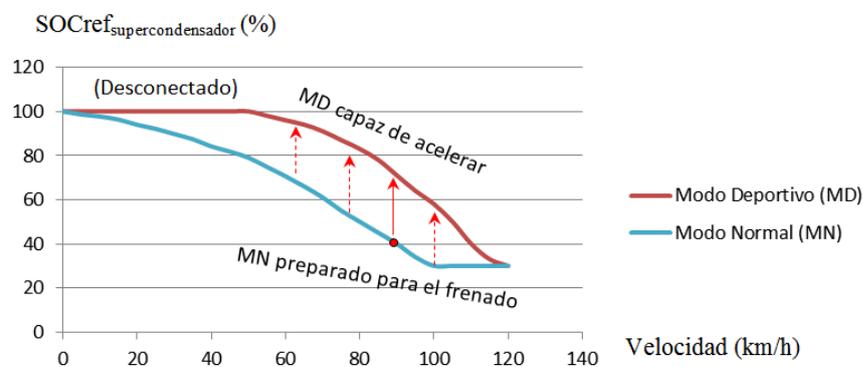


Figura 20. Estado de carga real (SOC_{real}), estado de carga de referencia (SOC_{ref}) y estado de carga de referencia del modo deportivo ($SOC_{ref_Deportivo}$)

➤ Necesidad del modo deportivo

Como acabamos de ver, con el Modo Normal las baterías pueden sufrir altas corrientes al realizar una aceleración a velocidad alta. Esto es debido a que el supercondensador está casi descargado (40 %, Figura 20) a la hora de realizar la aceleración a velocidad alta (90 km/h en este caso).

Por este motivo se ha implementado el Modo Deportivo, el cual almacena una mayor carga en el supercondensador incluso a velocidad alta, permitiendo acelerar de una velocidad alta a otra superior, como puede verse en la Gráfica 1.



Gráfica 1. Curvas explicativas del SOC de referencia en Modo Normal y Modo Deportivo



4.1.2. Modo Deportivo. Tiempo para su preparación

Volvamos a la situación anterior. Circulábamos en Modo Normal y hemos alcanzado los 90 km/h, velocidad que hemos mantenido durante un tiempo por lo que el supercondensador está casi descargado. Sin embargo, queremos seguir acelerando sin que este hecho perjudique a las baterías, por lo que conectamos el Modo Deportivo.

A continuación realizamos una simulación en la que conectamos el Modo Deportivo en $t=3s$. Este modo se podía conectar manualmente a partir de 50 km/h (circularamos a 90 km/h).

En la Figura 21, vemos como la corriente por las baterías necesaria para cargar el supercondensador a la vez que se mantiene una velocidad alta (90 km/h) se sale de los límites ideales (60 A) pero se mantiene dentro de los límites aceptables (100 A).

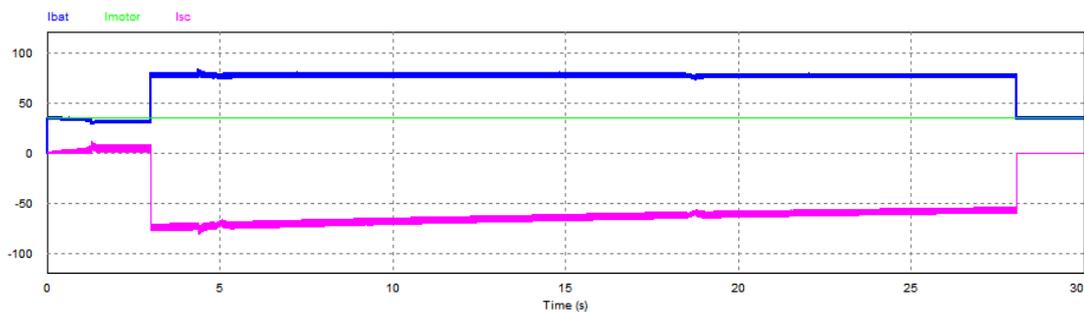


Figura 21. Corriente por las baterías (I_{bat}) y supercondensador (I_{sc}) para preparar el Modo Deportivo

En la Figura 22 vemos como al conectar el Modo Deportivo el SOC de referencia aumenta, por lo que el vehículo va a estar preparado para realizar una aceleración a velocidad alta. La referencia se alcanza en $t=28s$, por lo que al final de la Figura 21 la corriente vuelve a los valores necesarios para mantener la velocidad a 90 km/h (son 13 kW, 35 A en el motor, ver Tabla 3).

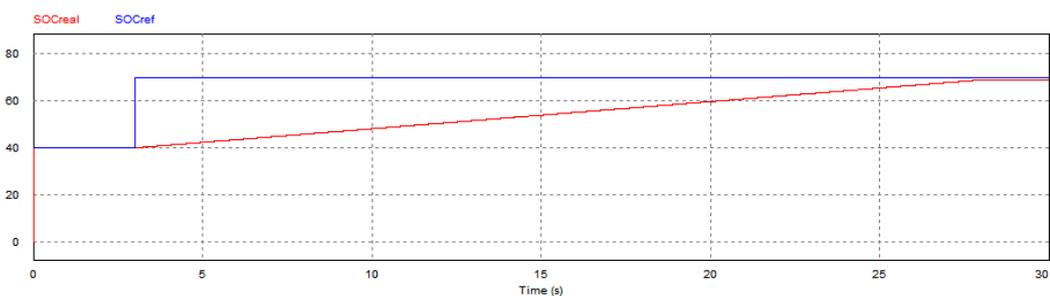


Figura 22. Estado de carga real (SOC_{real}) y estado de carga de referencia (SOC_{ref}) del supercondensador. Velocidad constante de 90 km/h.



Según las Figuras 21 y 22 tras conectar el Modo Deportivo se tardan 25 segundos ($28-3=25s$) en alcanzar la referencia. En la Figura 13 vemos como la tensión del supercondensador aumenta al conectar el Modo Deportivo.

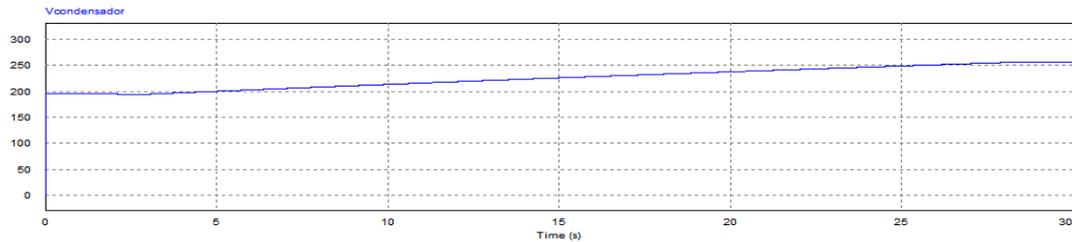


Figura 23. Aumento de la tensión del supercondensador al conectar el Modo Deportivo

Sin embargo, hemos considerado que para realizar la aceleración de forma aceptable no será necesario alcanzar completamente la referencia SOC. Por lo tanto, hemos instalado una señal que nos indica (y al conductor del vehículo) cuando el supercondensador está lo suficientemente cargado para realizar la aceleración (cuando se encuentra un 10 % por debajo del valor de referencia y al menos por encima del 45 % del SOC total). Esta señal puede verse en la Figura 24.

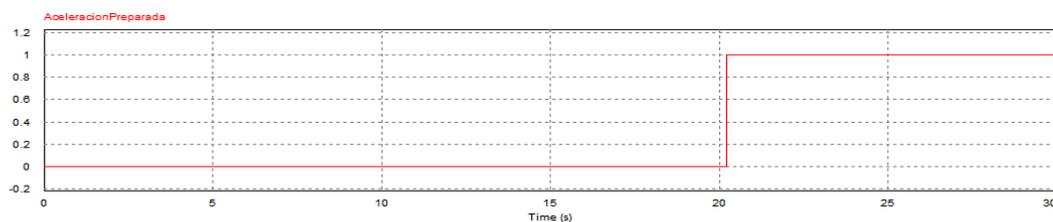


Figura 24. Vehículo capaz de acelerar de una velocidad alta a otra superior

Así pues, si consideramos lista la aceleración en $t=21s$, el Modo Deportivo (conectado en $t=3s$) tarda menos de 20 segundos en estar preparado para acelerar hasta velocidades de 120 km/h o superiores.

4.1.3. Simulación del modo deportivo

En el apartado 2.1 vimos como una aceleración 40-100 km/h era posible, ya que el supercondensador estaba cargado. Por otro lado, en el apartado 4.1.1 vimos como una aceleración 90-120 km/h en Modo Normal acorta la vida útil de las baterías, ya que a velocidad alta el supercondensador estaba descargado y todo el esfuerzo acababa recayendo en la batería.



En el apartado 4.1.2 anterior acabamos de ver como el Modo Deportivo tarda menos de 20 segundos en cargar el supercondensador y prepararse para una aceleración. Realizaremos la simulación con los mismos datos de partida que en el apartado 4.1.1, pero habiendo conectado el Modo Deportivo con anterioridad.

- Tensión de las baterías: 360 V
- Aceleración 90-120 km/h en 5 segundos.
- Potencia máxima del motor durante la aceleración (75 kW, 197 A) y potencia media para mantener la velocidad a 120 km/h (24 kW, 60 A)

El dato que varía respecto al caso anterior es la tensión inicial del supercondensador. En la simulación del apartado 4.1.1 se iniciaba en 195 V (correspondiente a 90 km/h en el Modo Normal). En este caso se inicia en 260 V (la correspondiente al 90 km/h en el Modo Deportivo). Es decir los valores finales de las Figuras 22 y 23, tras realizar la espera, son los valores iniciales de la Figura 27.

Iniciamos la simulación, comprobamos como ha variado la velocidad y potencia.

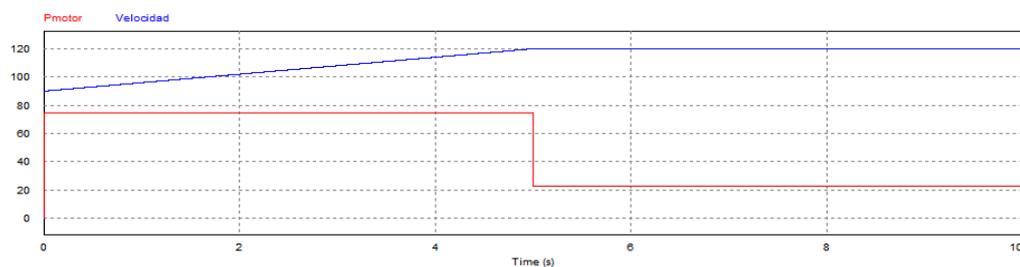


Figura 25. Velocidad (km/h) y Potencia (kW). Aceleración 90-120 km/h en 5 segundos

En la Figura 26 vemos como efectivamente la batería se mantiene en los límites de 60 A. Por lo tanto, a diferencia de los resultados de la Figura 18 (sin el Modo Deportivo), en este caso no se alcanzan corrientes de 100 y 200 A en las baterías. De esta forma se puede acelerar a grandes velocidades sin disminuir la vida útil de las baterías.

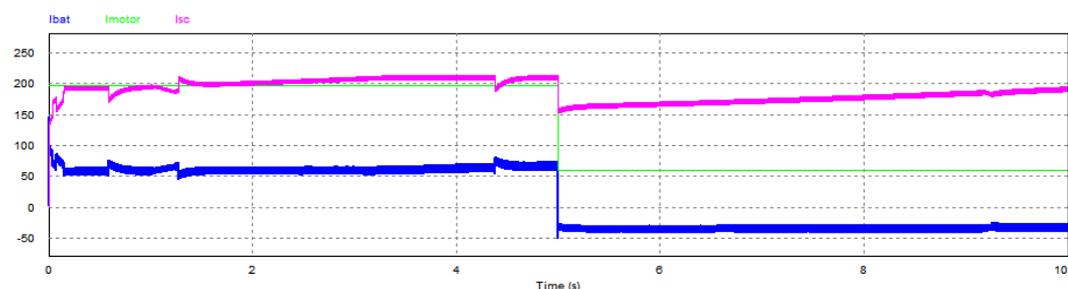


Figura 26. Corriente del supercondensador (I_{SC}), de la batería (I_{bat}) y motor (I_{motor})



Tras realizar la aceleración (a partir de $t=5s$), la energía sobrante del supercondensador se descarga sobre el motor y baterías (igual que sucedía en el apartado 2.1). El sistema se prepara para realizar un frenado, ya que es improbable que queramos ir a más de 120 km/h. Si prolongásemos el tiempo de simulación el supercondensador llegaría al mínimo de 170 V y las baterías volverían a ser las encargadas de mantener la velocidad.

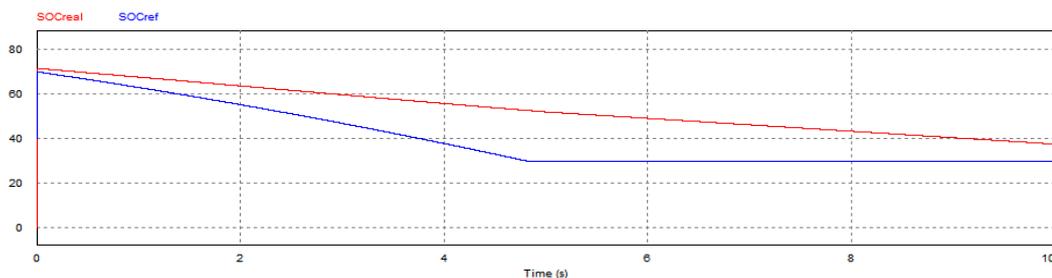


Figura 27. Estado de carga real (SOC_{real}) y estado de carga de referencia (SOC_{ref}) del supercondensador

➤ Modo Deportivo. Análisis de resultados. Velocidad máxima

El Modo Deportivo nos permite acelerar partiendo de velocidades elevadas (80-100 km/h), y alcanzar velocidades mayores (120 km/h o más). Estos eventos acortaban la vida útil de las baterías en el Modo Normal, pero no en el Modo Deportivo.

Una vez alcanzadas esas velocidades (110-120 km/h) no podemos realizar segundas aceleraciones hasta 140 km/h (sí se podría alcanzar directamente estas velocidades si aceleramos de 90 a 140 km/h de forma continua). En cualquier caso, si se deseara que el vehículo alcanzase una velocidad aún mayor se podría crear un nuevo modo (Modo Alta Velocidad), o modificar la curva de gestión del SOC del Modo Deportivo. Estos cambios apenas supondrían tiempo y coste, ya que solo habría que modificar los coeficientes del polinomio que aproxima la curva $SOC = f(velocidad)$ en el programa de control.

Por otro lado, hemos visto que las baterías son capaces de mantener la velocidad de 120 km/h con una corriente en torno a 60 A. Es posible (pero no recomendable) conducir a velocidades mayores de 120-140 km/h. El problema es que a partir de ese punto la corriente de las baterías excede los límites ideales (60 A) simplemente para el objetivo de mantener la velocidad.



En conclusión, el Modo Deportivo del sistema MES-AES, sin ser más que una pequeña variación en el sistema de control, permite mejorar las características del vehículo eléctrico cuando circulamos a alta velocidad. El Modo Deportivo no solo es de gran importancia para alargar la vida útil de las baterías, sino que también tiene una gran relevancia de cara a la venta del vehículo.

4.2. Modo Escalada. Simulaciones.

4.2.1. Pendientes prolongadas. Limitaciones del modo normal

Todas las simulaciones anteriores han sido realizadas suponiendo un terreno aproximadamente llano. Sin embargo, si la pendiente es considerable, el simple hecho de mantener la velocidad puede requerir del uso del supercondensador para reducir la corriente por las baterías.

Vamos a suponer que circulamos a 80 km/h (22,2 m/s). En un terreno llano esto requeriría unos 10 kW (26 A) del motor, por lo que las baterías podrían asumirlo sin problemas. Sin embargo, ante una pendiente del 10% y 50 metros de cota, si queremos mantener la velocidad constante, el resultado es el siguiente:

$$E_p = mgh = 1400 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 50 \text{ m} = 686,7 \text{ kJ} \quad (3.0)$$

$$L_{\text{pendiente}} = \frac{h}{\text{inclinación}} = \frac{50 \text{ m}}{0,1} = 500 \text{ m} \quad (3.1)$$

$$t_{\text{ascenso}} = \frac{L_{\text{pendiente}}}{v} = \frac{500 \text{ m}}{22,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 22,5 \text{ s} \quad (3.2)$$

$$P_{\text{ascenso}} = \frac{E_p}{t_{\text{ascenso}}} = \frac{686,7 \text{ kJ}}{22,5 \text{ s}} = 30 \text{ kW} \quad (3.3)$$

$$P_{\text{total}} = P_{\text{mantener velocidad}} + P_{\text{ascenso}} = 10 + 30 = 40 \text{ kW} \quad (3.4)$$

$$P_{\text{Media baterías}} = 360 \text{ V} \cdot 60 \text{ A} = 21,6 \text{ kW} \quad (3.5)$$

$$P_{\text{Media baterías}} < P_{\text{total}} \Rightarrow \text{Necesario supercondensador} \quad (3.6)$$



Para realizar el ascenso manteniendo la velocidad constante, la potencia necesaria en el motor (40 kW, según la Ecuación 3.4) es mayor a la que pueden proporcionar las baterías trabajando dentro de los límites establecidos (Ecuaciones 3.5 y 3.6), por lo que será necesario el supercondensador.

A la hora de dimensionar el supercondensador, lo habíamos preparado para que fuese capaz de almacenar la suficiente energía como para superar una pendiente como la planteada. El problema es que a 80 km/h en el Modo Normal el supercondensador se encuentra a la mitad de su carga (al 50 % del SOC, correspondiente a 217,6 V según las Tablas 1 y 2). Por lo tanto, al final de la pendiente el supercondensador se agotará y el esfuerzo del ascenso recaerá en las baterías.

Comprobamos cómo se comporta el sistema en Modo Normal ante una pendiente realizada a una velocidad constante media-alta (80 km/h). Habíamos calculado que el tiempo de ascenso era de 22,5 segundos (ecuación 3.2); simulamos 20 segundos (la mayor parte del ascenso).

Como la pendiente es constante y queremos mantener la velocidad en 80 km/h, en este caso la potencia es constante, como se puede ver en la Figura 28.

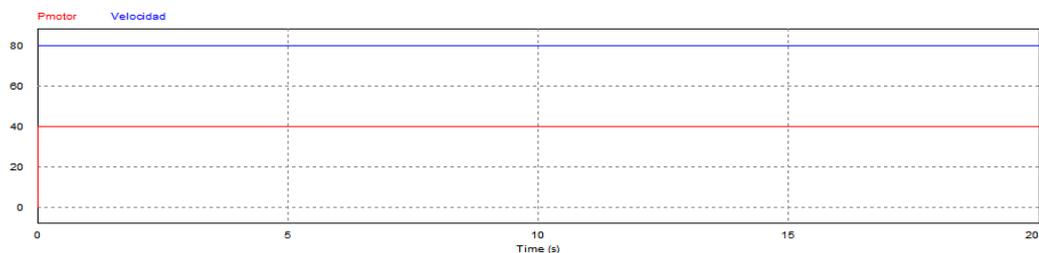


Figura 28. Velocidad (km/h) y Potencia (kW). Velocidad y potencia constantes durante el ascenso

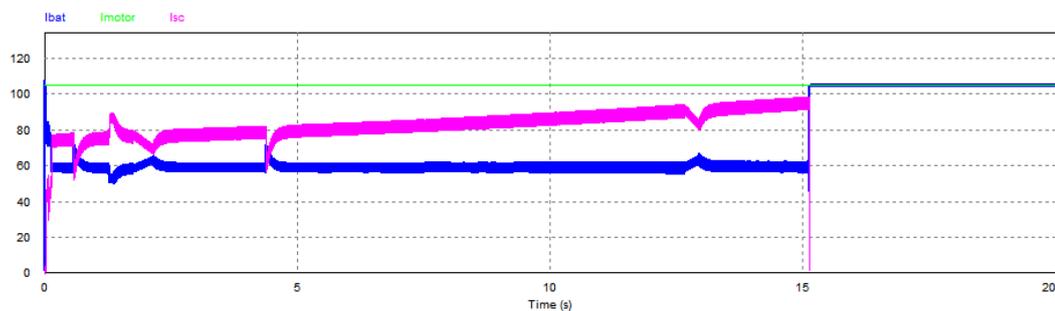


Figura 29. Corriente del supercondensador (I_{SC}), de la batería (I_{bat}) y motor (I_{motor})



En la Figura 30 vemos como en $t=15s$ el supercondensador alcanza el mínimo (SOC del 30 % ó 170 V, Tablas 1 y 2) y en la Figura 29 observamos que después de $t=15s$ el supercondensador deja de prestar apoyo para realizar el ascenso ($I_{sc} = 0$) y las baterías son las encargadas de proporcionar toda la energía al motor ($I_{bat} = 105 A$) hasta el final de la cuesta, sobrepasando I_{bat} los límites aceptables.

Tras la pendiente, el supercondensador volvería a recargarse hasta el valor de referencia de la Tabla 1: 80 km/h \Rightarrow 50 % del SOC, como se ve en la Figura 30. Este valor volvería a ser insuficiente para afrontar una segunda pendiente unos cientos de metros más adelante.

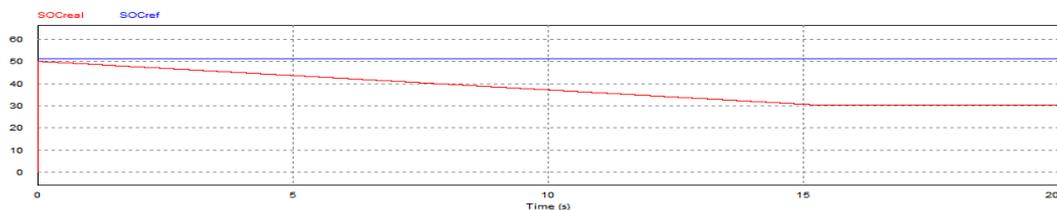


Figura 30. Estado de carga real (SOC_{real}) y estado de carga de referencia (SOC_{ref}) del supercondensador

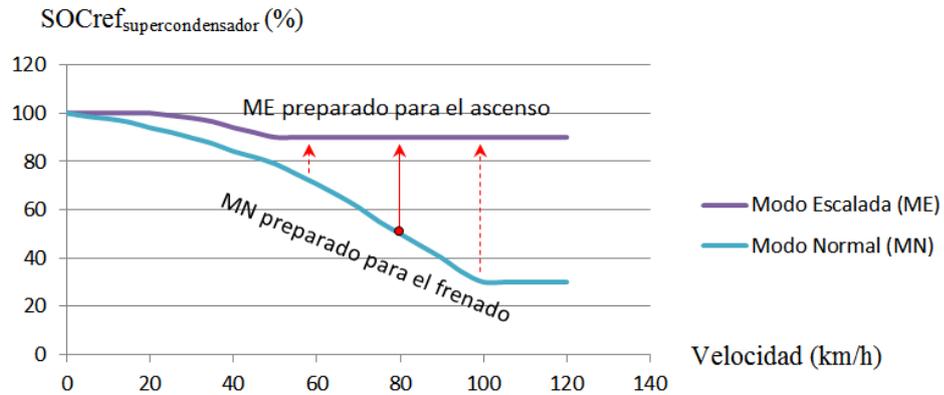
➤ Necesidad del modo escalada

En el Modo Normal, circulando a velocidades altas, el sistema desconoce la existencia de una futura pendiente y se encuentra sin la carga suficiente para ejecutar un ascenso sin provocar altas corrientes en las baterías (105 A, final de la Figura 29), ya que en realidad el sistema estaba preparado para un frenado.

Esto se debe a que el supercondensador comienza la pendiente a media carga (50 %). Como el mínimo del supercondensador se ha establecido en el 30 % esto da muy poco margen para enfrentar una pendiente prolongada.

Esto también sucedería, aunque en menor medida, funcionando en Modo Deportivo, ya que ese modo guarda más energía en el supercondensador a velocidades altas. Circulando a velocidades bajas en el Modo Normal esto no sucedería, ya que el supercondensador si está cargado en esas condiciones.

Por este motivo se ha implementado el Modo Escalada, en el que el SOC se mantiene en un mínimo del 90 % de su energía independientemente de la velocidad, por lo que siempre está preparado para una hipotética pendiente (a no ser que esta sea kilométrica). La curva del SOC en el Modo Escalada puede verse en la Gráfica 2.



Gráfica 2. Curvas explicativas del SOC de referencia en Modo Normal y Modo Escalada

4.2.2. Simulación del modo escalada

Para simular el modo escalada vamos a realizar la misma pendiente del apartado 4.2.1 anterior, manteniendo la misma velocidad. El dato que varía es la tensión inicial del supercondensador. Circulando a una velocidad de 80 km/h en el Modo Normal es de 217,6 V, mientras que en el Modo Escalada es de 290 V, correspondiente al 90 % de su energía (ver Tablas 1 y 2).

En este caso vamos a suponer que el conductor conoce el trayecto y ha conectado el Modo Escalada con la suficiente anterioridad como para que la carga del supercondensador haya alcanzado la referencia (90 %). En el apartado 4.1.2 ya hemos visto que el supercondensador puede tardar como medio minuto en cargarse hasta niveles aceptables. Este tiempo debería ser suficiente si conocemos el trayecto o existe señalización de la pendiente.

En esta ocasión simularemos 25 segundos, algo más de los 22 segundos que nos lleva completar la pendiente, para saber qué sucede tras finalizarla.

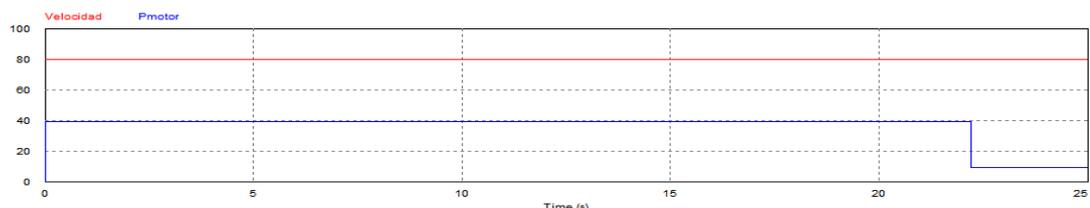


Figura 31. Velocidad (km/h) y Potencia (kW). Velocidad y potencia constantes durante el ascenso. Al acabarlo la potencia necesaria se reduce.



Como se ve en la Figura 31, la velocidad tras realizar la pendiente se sigue manteniendo constante, y la potencia para mantener la velocidad en un terreno llano se reduce a 10 kW (26 A en el motor).

En la Figura 32, el supercondensador proporciona energía durante todo el ascenso, manteniendo la corriente de la batería en los 60 A ideales. Cuando el ascenso termina ($t=22s$) la batería debe mantener la velocidad y recargar el supercondensador, ya que seguimos en el Modo Escalada.

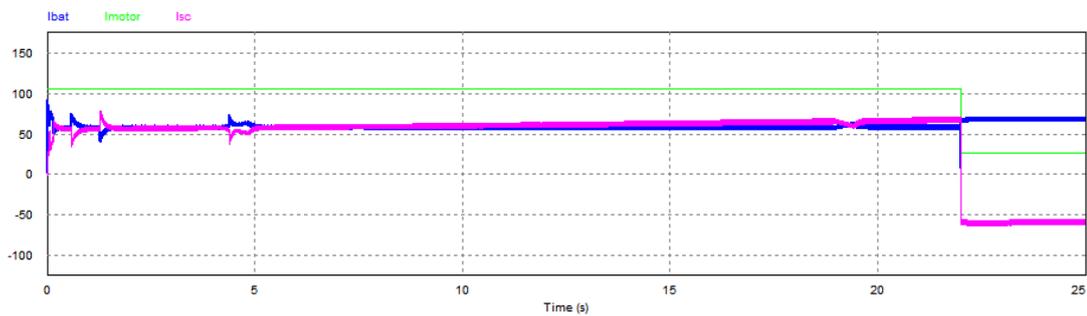


Figura 32. Corriente del supercondensador (I_{SC}), de la batería (I_{bat}) y motor (I_{motor})

En la Figura 33 vemos como al final del ascenso aún queda gran parte de la energía (un 60 %) en el supercondensador (se puede afrontar una pendiente aún mayor). Como no se ha desconectado el Modo Escalada tras llegar al terreno llano ($t=22s$) vuelve a empezar a cargarse hasta la referencia del 90 % (preparándose para una posible segunda pendiente).

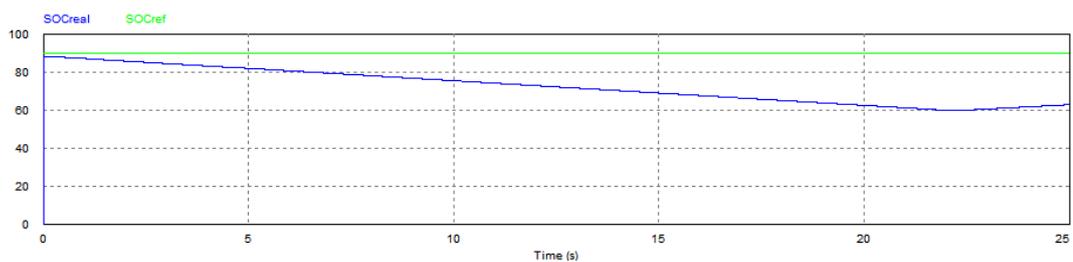


Figura 33. Estado de carga real (SOC_{real}) y estado de carga de referencia (SOC_{ref}) del supercondensador

➤ Modo Escalada. Análisis de Resultados

El Modo Escalada permite afrontar pendientes a alta velocidad sin que esto afecte a la velocidad o las baterías.



Aunque también pueda parecer un buen modo para acelerar a velocidades altas (como el Modo Deportivo), no está ideado para estar permanentemente conectado en una vía rápida, ya que ante un frenado regenerativo no puede absorber demasiada energía (un máximo de un 10%), lo que repercutiría en la eficiencia y autonomía del vehículo.

Por el contrario, la probabilidad de que se realice una frenada regenerativa a mitad de un ascenso es baja. Si hubiésemos terminado de culminar una serie de ascensos y solamente quedasen tramos de bajada lo más indicado sería conectar el Modo Normal o el Modo Descenso.

4.3. Modo Descenso. Simulaciones

4.3.1. Descensos prolongados. Limitaciones del Modo Normal

Para comprobar la necesidad del Modo Descenso vamos a realizar una pendiente descendente. En esta ocasión será un descenso de gran pendiente (20 %), con 50 metros de diferencia de cota.

Como la pendiente es mayor (y con posibles curvas) en este caso el recorrido será realizado a una velocidad menor y más segura. Finalmente usaremos una velocidad de 40 km/h (11,1 m/s).

En nuestra simulación el vehículo se dejará caer. Mediante el frenado que produce el motor mantendremos los 40 km/h, impidiendo que el vehículo se embale y regenerando energía en el proceso. La potencia del motor para mantener 40 km/h son 4,5 kW.

$$E_p = mgh = 1400 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (-50 \text{ m}) = -686,7 \text{ kJ} \quad (4.1)$$

$$L_{\text{pendiente}} = \frac{h}{\text{inclinación}} = \frac{50\text{m}}{0,2} = 250 \text{ m} \quad (4.2)$$

$$t_{\text{descenso}} = \frac{L_{\text{pendiente}}}{v} = \frac{250 \text{ m}}{11,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 22,5 \text{ s} \quad (4.3)$$



$$P_{\text{absorber}} = \frac{E_p}{t_{\text{ascenso}}} = \frac{-686,7 \text{ kJ}}{22,5 \text{ s}} = -30 \text{ kW} \quad (4.4)$$

$$P_{\text{total absorber}} = P_{\text{mantener velocidad}} - P_{\text{absorber}} = 4,5 - 30 = -25,5 \text{ kW} \quad (4.5)$$

En este caso pondremos la batería en su valor mínimo de 336 V (90 % de descarga).

$$P_{\text{Mín reg. Baterías}} = 336 \text{ V} \cdot (-60 \text{ A}) = -20,16 \text{ kW} \quad (4.6)$$

$$|P_{\text{Mín reg. Baterías}}| < |P_{\text{total absorber}}| \Rightarrow \text{Necesario Supercondensador} \quad (4.7)$$

A 40 km/h el supercondensador debería estar a 283 V (Tabla 2). Para poder ver la verdadera utilidad del Modo Descenso iremos a un caso muy concreto: momentos antes de iniciar la simulación, el vehículo estaba detenido en lo alto de la pendiente.

Por este motivo la tensión del supercondensador no es de 283 V si no que es prácticamente del valor máximo (a 0 km/h serían 307,8 V). Con el descenso apenas se ha gastado energía en la aceleración y no le hemos dado tiempo a descargar energía y alcanzar los 283 V de referencia (la limitación de -60 A de las baterías obliga al supercondensador a absorber energía y le impide descargarse). Finalmente decidimos iniciar la simulación con un valor de 303 V (suponemos que algo sí se ha descargado al arrancar).

La potencia que se regenera (-25,5 kW, Ecuación 4.5) corresponden a una corriente regenerativa -67 A en el motor. En la parte final del descenso ($t=22$ s) realizaremos un frenado 40-0 km/h de 3 segundos que aumenta la corriente regenerativa hasta un total de -130 A (regeneración por el descenso más el frenado). Con el vehículo parado ($t=25$ s) el motor no exige corriente.

Introducimos los datos y obtenemos los siguientes resultados:

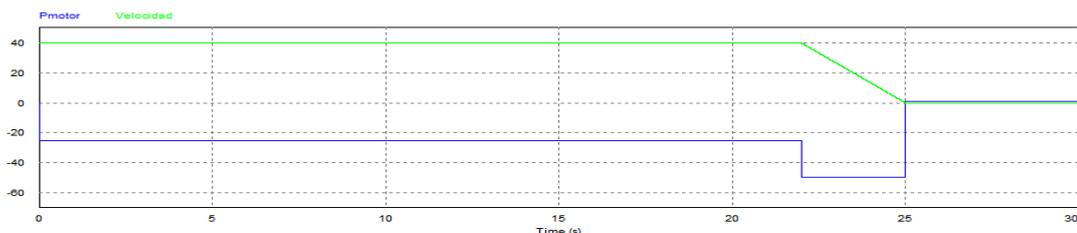


Figura 34. Velocidad (km/h) y Potencia (kW). Velocidad y potencia constantes durante el descenso. En $t=22$ s se produce un frenado 40-0 km/h en 3 segundos



Observando la Figura 35, la corriente por las baterías se mantiene en 60 A (ideales) hasta $t=16$. En $t=16$ s el supercondensador se carga por completo y la corriente en las baterías aumenta hasta los -67 A regenerativos del motor (sigue siendo un valor aceptable).

Sin embargo, en $t=22$ s cuando se realiza el frenado definitivo, el supercondensador está cargado al máximo y no puede absorber más energía (por programa hemos impedido que se produzcan sobretensiones en el supercondensador). Por lo tanto, las baterías reciben toda la corriente regenerativa (-130 A), lo que es perjudicial.

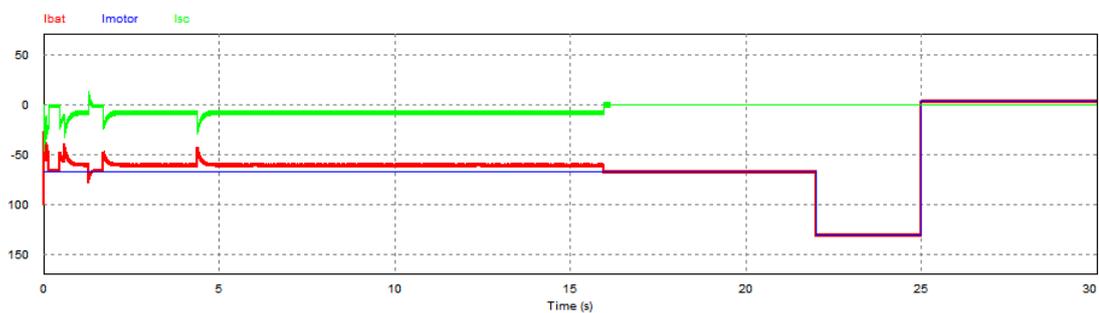


Figura 35. Corriente del supercondensador (I_{SC}), de la batería (I_{bat}) y motor (I_{motor})

No hemos desarrollado el sistema que activa los frenos convencionales, pero probablemente no entrarían en actuación en un frenado tan pequeño (40-0 km/h en 3 segundos). Además, cuanto menos energía disipemos con el frenado convencional y más energía regeneremos con el frenado eléctrico mejor, ya que así se aumenta la eficiencia del vehículo y se alarga su autonomía.

Como podemos ver en la Figura 36, el supercondensador no puede alcanzar su referencia porque el frenado (que es prioritario) le impide descargarse. Al contrario, se carga hasta el su nivel máximo. Cuando llega el momento del frenado definitivo ($t=22$ segundos) el supercondensador ya está al máximo y no puede absorber más energía.

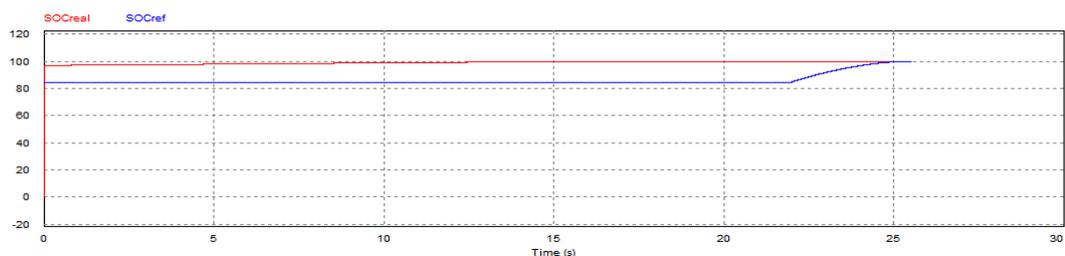


Figura 36. Estado de carga real (SOC_{real}) y estado de carga de referencia (SOC_{ref}) del supercondensador. La línea roja (SOC_{real}) se encuentra al 100 % en el momento del frenado ($t=22$ s)

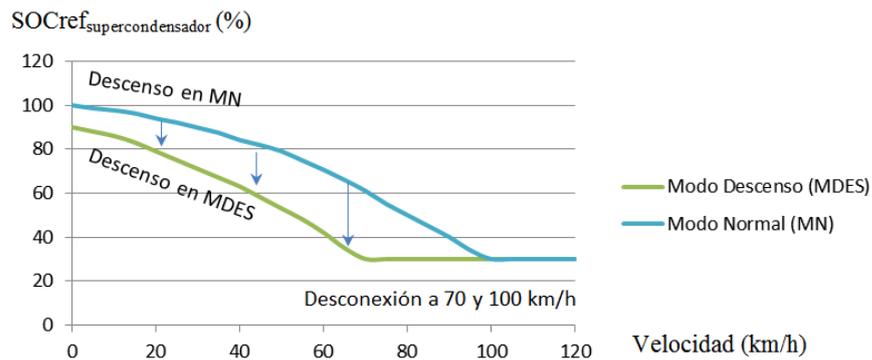


➤ Necesidad del modo descenso

En el Modo Normal el supercondensador puede cargarse al 100 % en un descenso con recuperación de energía y a la hora de realizar el frenado definitivo no puede seguir absorbiendo energía, desviándose toda la corriente regenerativa por las baterías.

Esta corriente, además de ser perjudicial para el paquete de baterías, disminuye el rendimiento del sistema, ya que el conjunto de baterías más supercondensadores es más eficiente absorbiendo energía que las baterías por si solas.

Esto justifica el desarrollo del Modo Descenso, que almacena menores valores del SOC en función de la velocidad, permitiendo absorber mayor cantidad de energía.



Gráfica 3. Curvas explicativas del SOC de referencia en Modo Normal y Modo Descenso

4.3.2. Simulación del Modo Descenso

Realizamos la misma simulación anterior activando el Modo Descenso.

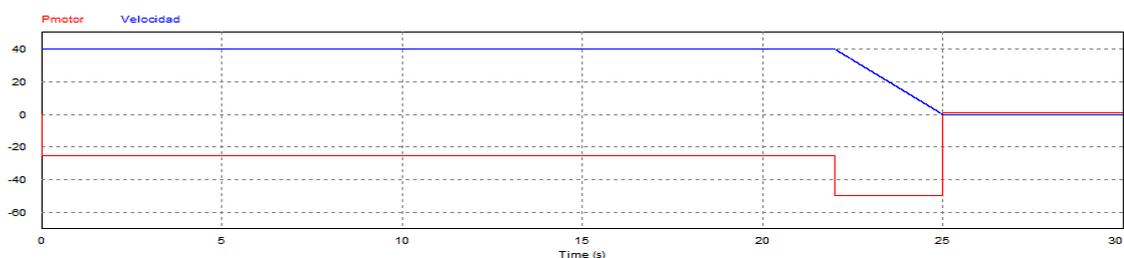


Figura 37. Velocidad (km/h) y Potencia (kW). Velocidad y potencia constantes durante el descenso. En $t=22s$ se produce un frenado 40-0 km/h en 3 segundos. (Es idéntica a la Figura 34).



El único dato que cambia es la tensión inicial del supercondensador. Incluso con el vehículo detenido, el Modo Descenso solo almacena hasta un 90 % de la carga del supercondensador. Por lo tanto, la mayor tensión posible en el supercondensador en el arranque será de 290 V, frente a los 307,8 V anteriores (en la simulación anterior usábamos 303 V, considerando que había dado tiempo a descargar parte de la energía, e incluso así el Modo Normal tuvo problemas con la corriente de las baterías).

Como podemos ver en la Figura 38 la corriente por las baterías I_{bat} se mantiene en -60 A durante el descenso (hasta $t=22s$) y también durante el posterior frenado definitivo (de $t=22s$ a $t=25s$). No alcanza valores de 130 A como los de la Figura 35 de la simulación en Modo Normal anterior.

Posteriormente (de $t=25s$ en adelante) la corriente I_{bat} alcanza 100 A (valores aceptables). Esto es debido a que el Modo Descenso aún está conectado y el supercondensador intenta descargarse rápidamente sobre las baterías para alcanzar el nivel del 90 % (el nivel que tenía en $t=0s$, ver Figura 39).

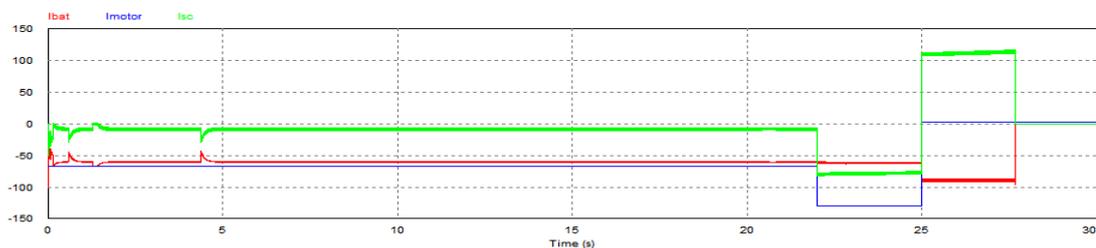


Figura 38. Corriente del supercondensador (I_{SC}), de la batería (I_{bat}) y motor (I_{motor})

De esta forma, el Modo Descenso se prepara para un posible segundo descenso en el que nos interesa volver a absorber toda esa energía sin que en ningún tramo las baterías superen ampliamente los 100 A (como sí ocurría en la Figura 35, usando el Modo Normal). El supercondensador alcanza la referencia y acaba de descargarse en $t=28s$ (su corriente I_{SC} se vuelve 0 en la Figura 38).

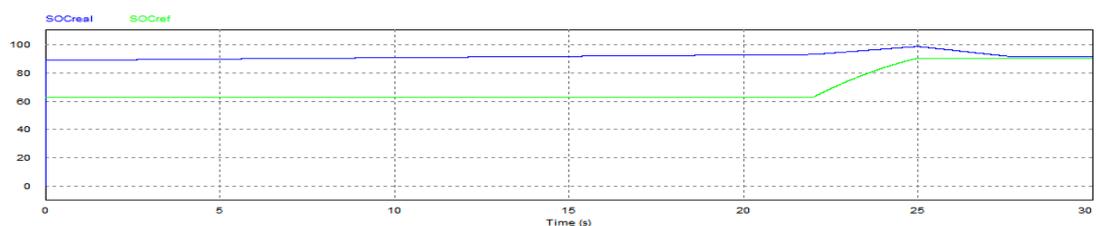


Figura 39. Estado de carga real (SOC_{real}) y estado de carga de referencia (SOC_{ref}) del supercondensador. El supercondensador no alcanza el 100 % (a diferencia de la Figura 36)



Gracias al Modo Descenso las baterías han podido absorber la energía potencial del descenso y la energía cinética de la velocidad en el frenado. Asimismo, cuando el vehículo se detiene en $t=25s$, las baterías absorben también la energía que el supercondensador ha regenerado durante todo el proceso. El supercondensador se descarga y prepara para seguir absorbiendo más energía en el siguiente descenso.

Como podemos ver en la Figura 40, esto permite aprovechar al máximo toda la energía del descenso y frenado para recargar las baterías.

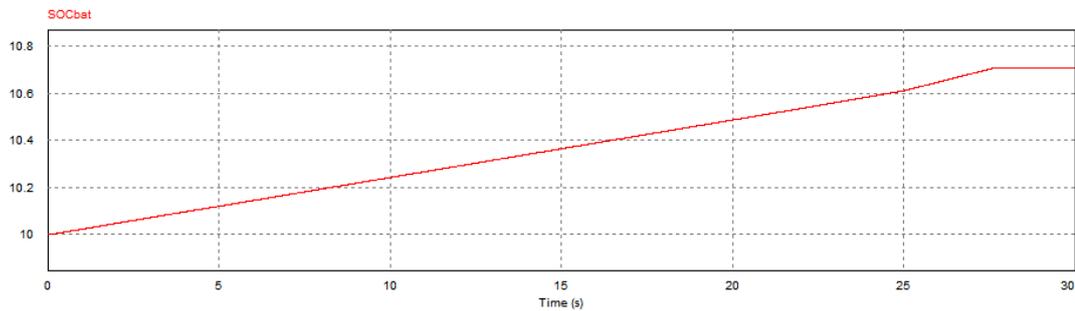


Figura 40. Estado de carga de la batería (SOC_{bat}) durante la simulación del Modo Descenso

➤ Modo Descenso. Análisis de resultados.

El Modo Descenso permite aprovechar de forma eficiente la energía de descensos prolongados (con frenados intermedios incluidos) sin que esto provoque sobretensiones en el supercondensador ni corrientes de recarga elevadas en las baterías.

A la misma velocidad, este modo almacena menos energía que el resto de modos de gestión del SOC. Está preparado para que el supercondensador pueda absorber mayor cantidad de energía. No está preparado para realizar grandes aceleraciones, lo cual precisamente no es necesario cuando se realiza un descenso y motivo por el que se desconecta automáticamente a partir de 70 km/h.



5. CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN DE LOS DIFERENTES MODOS

En la Tabla 1 del anexo N°10, *Desarrollo del algoritmo de control*, se agrupan los métodos de conexión y desconexión de los diferentes modos de gestión del SOC del supercondensador. A continuación vamos a comprobar que esta tabla se ejecuta de forma correcta en el programa.

5.1. Conexión y desconexión del Modo Deportivo

Cuando la velocidad sobrepasa los 100 km/h el Modo Deportivo se conecta automáticamente. El programa ha sido realizado de tal forma que si la velocidad desciende (ej.: 90-80 km/h) el sistema siga manteniendo este modo, ya que es probable que sigamos en una vía rápida. Así pues, el sistema no se desconecta hasta que la velocidad baje de 50 km/h o se desconecte manualmente (ver Figura 41).

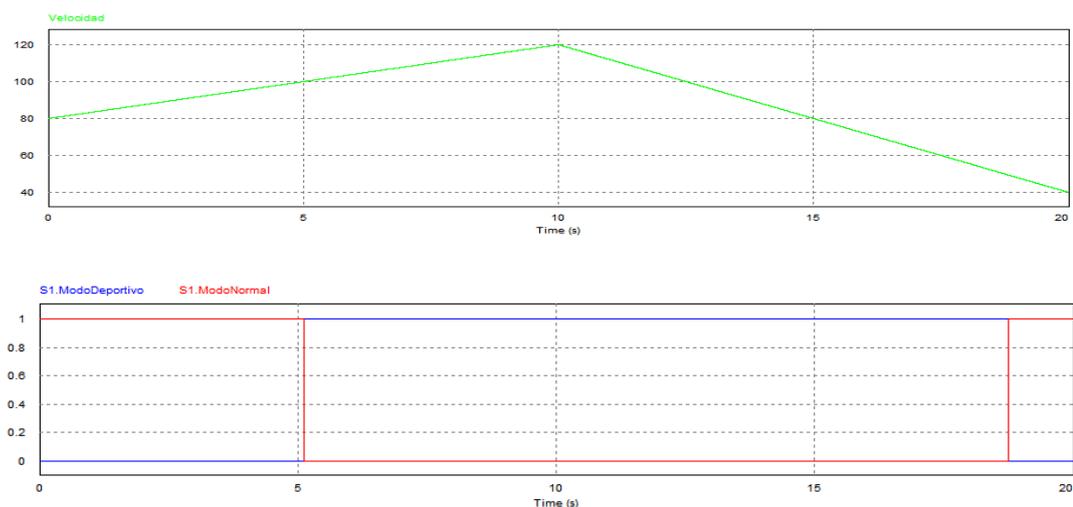


Figura 41. Conexión y desconexión automática del modo deportivo con la variación de la velocidad

5.2. Conexión y desconexión del Modo Escalada

El Modo Escalada se puede conectar y desconectar cuando se desee, teniendo siempre prioridad sobre el resto. Incluso puede conectarse por encima de 100 km/h, ya que puede usarse para afrontar una pendiente a alta velocidad o también para alcanzar velocidades muy altas y realizar un adelantamiento (aunque no tiene apenas capacidad para aprovechar un posterior frenado regenerativo).



Si el Modo Escalada se desconecta por encima de 100 km/h se vuelve al Modo Deportivo (Figura 43). Si se desconecta por debajo de 100 km/h vuelve al Modo Manual (Figura 44). En la simulación conectamos el modo escalada con prioridad sobre el deportivo en $t=3s$ y lo desconectábamos en $t=8s$ y $t=15s$, Figura 43 y Figura 44, respectivamente.

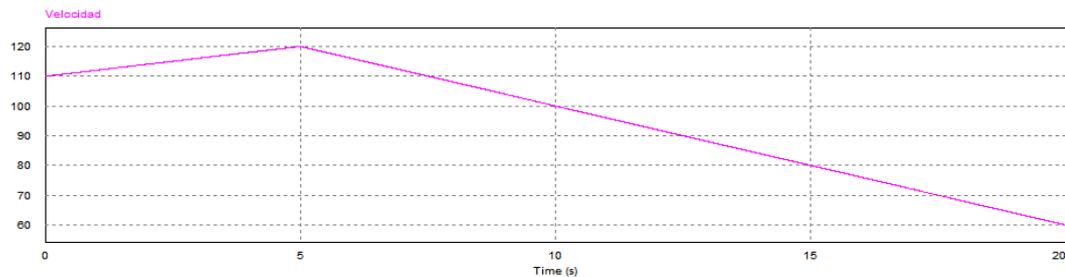


Figura 42. Conexión y desconexión manual del modo escalada a diferentes velocidades

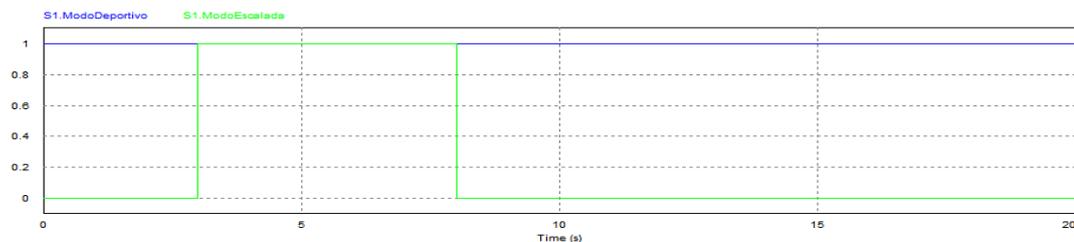


Figura 43. Conexión y desconexión manual del modo escalada a velocidades superiores a 100 km/h ($t=8s$)

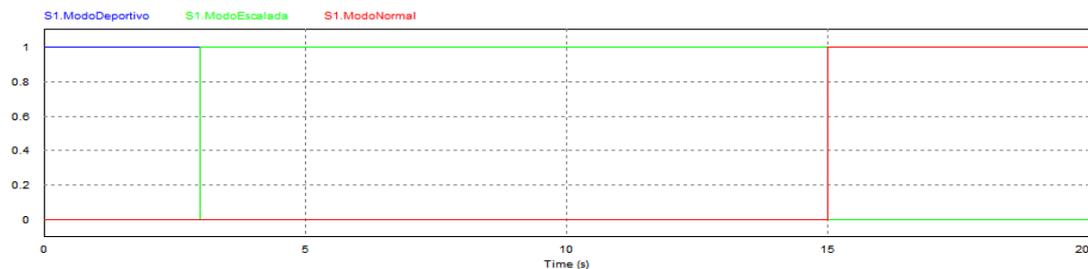


Figura 44. Conexión manual del modo escalada a velocidad superior a 100 km/h y desconexión manual a velocidad inferior a 100 km/h ($t=15s$)

Aprovechamos esta última simulación (la de la Figura 44) para revisar como varía el SOC de referencia según varía la velocidad y el modo de funcionamiento. En este caso particular vemos como en el Modo Deportivo el SOC desciende, ya que la velocidad está aumentando (de 110 a 120 km/h). En el Modo Escalada ($t=3s$) el SOC mínimo es de un 90 %. Y en el Modo Normal (a partir de $t=15s$) el SOC aumenta, ya que en esos momentos la velocidad está disminuyendo (se puede comprobar los valores exactos comparando la Figura 42 y la Tabla 1, examinando el resultado en la Figura 45).

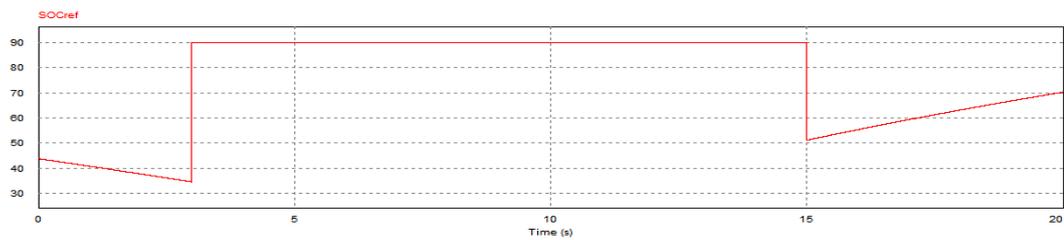


Figura 45. Variación del SOC en función de la velocidad y el Modo de gestión (Deportivo-Escalada-Normal)

5.3. Conexión y desconexión del Modo Descenso

El Modo Descenso solo puede conectarse manualmente cuando circulamos por debajo de 70 km/h. Si se supera esa velocidad debe desconectarse. Este modo es sustituido siempre por el Modo Normal. Comprobamos su funcionamiento en la Figura 46.

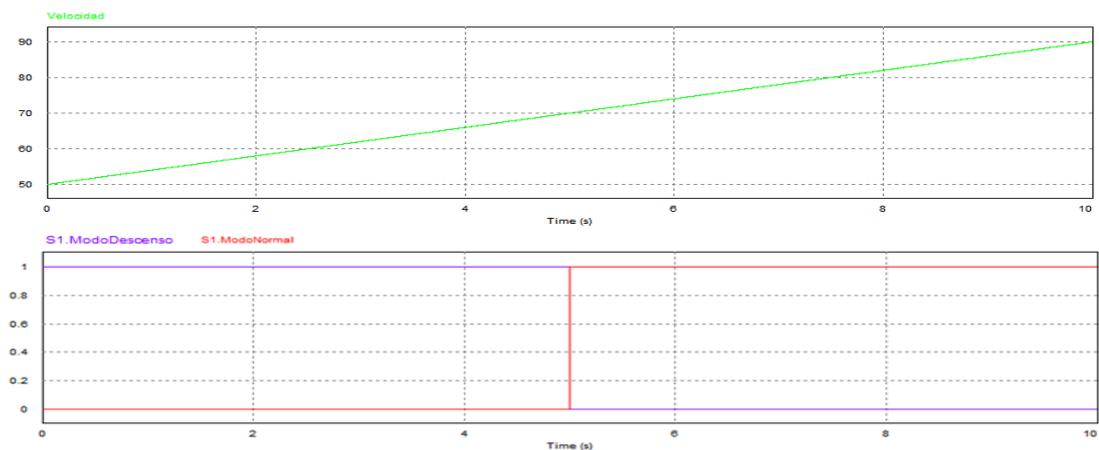


Figura 46. Desconexión automática del modo descenso con la variación de la velocidad

6. EMISIONES ELECTROMAGNÉTICAS

En el interior del vehículo se suelen encontrar un gran número de elementos electrónicos (radio, GPS, etc.). Por ello también es importante realizar un análisis electromagnético, para saber si las interferencias generadas por el sistema MES-AES podrían afectar a estos sistemas, así como a nuestro propio sistema (ej.: Disparos intempestivos en los IGBT).

Para ello realizamos un análisis de Fourier obteniendo los resultados de la Figura 47:

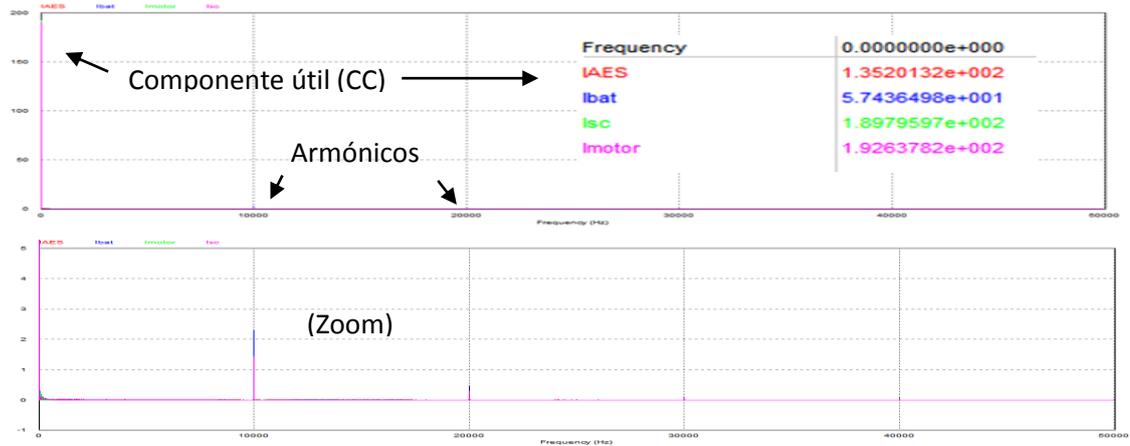


Figura 47. Sistema MES-AES. Análisis de Fourier.

Como podemos ver en la Figura 47, los armónicos tienen un valor bajo en comparación con la de corriente continua ($I_{bat_{CC}} = 57,4 \text{ A} / I_{bat_{10kHz}} = 2,3 \text{ A}$). El condensador introducido para reducir el rizado de la batería ha eliminado ya gran parte de estos armónicos. Con los datos obtenidos calculamos la distorsión armónica total respecto a la componente útil:

$$THD_{\text{corriente}} = \frac{\sqrt{\sum A_{\text{total}}^2 - A_1^2}}{A_1} \cdot 100 = \frac{\sqrt{60^2 - 57,4^2}}{57,4^2} \cdot 100 = 0,53 \% \quad (5.1)$$

Como vemos en la ecuación 5, el THD tiene un valor bajo. Los armónicos de mayor valor se producen en un rango de 10-20 kHz. Trabajando a estas frecuencias las interferencias se producen principalmente por conducción así como por acoplamiento inductivo y capacitivo. Para disminuir el efecto de las interferencias que pudiesen producirse se tomarán las medidas de apantallamiento y conexión a masa que se exigen en el *Pliego de condiciones*.

Con estos armónicos de 10-20 kHz no van a existir interferencias radiadas. Para que estas interferencias tuviesen que ser tenidas en cuenta nuestros cables deberían tener al menos un décimo de la longitud de onda:

$$L = \frac{\lambda}{10} = \frac{c}{f} \cdot \frac{1}{10} = \frac{300.000 \text{ km/s}}{10.000 \text{ Hz}} \cdot \frac{1}{10} = 3 \text{ km} \quad (5.2)$$

Obviamente, los cables de nuestro sistema van a ser de longitud mucho menor al resultado de la ecuación 5.2, por lo que queda confirmado que no van a existir este tipo de interferencias.



7. RENDIMIENTO DEL SISTEMA

En varias ocasiones hemos comentado que el sistema MES-AES compuesto por baterías y supercondensadores tiene un mayor rendimiento que aquellos sistemas que utilizan exclusivamente las baterías.

Para calcular el rendimiento volveremos a los datos del apartado 2.1 y realizaremos una simulación de exclusivamente los 7 segundos que dura la aceleración. Utilizamos esta simulación para comprobar la eficiencia con la que se está utilizando la energía en condiciones considerablemente exigentes. Tomamos los datos necesarios para el cálculo del rendimiento (Figuras 48.1, 48.2 y 48.3):

Average Value		
Time From		1.0000000e-005
Time To		7.0000000e+000
I(T1)		5.4301790e+001
I(T2)		-1.3579822e+002

RMS Value		
Time From		1.0000000e-005
Time To		7.0000000e+000
I(T1)		1.0248633e+002
I(T2)		1.6060605e+002

Figura 48.1. Corriente media y eficaz por los diodos e IGBT

Average Value		
Time From		1.0000000e-005
Time To		7.0000000e+000
Isc		1.9010003e+002

RMS Value		
Time From		1.0000000e-005
Time To		7.0000000e+000
Ibat		6.1088886e+001

Figura 48.2. Corriente media por batería y supercondensador ($I_m \approx I_{ef}$)

Average Value		
Time From		1.0000000e-005
Time To		7.0000000e+000
VLs*(Ls)		6.4261223e+001

Figura 48.3. Pérdidas en el bobinado

Aunque la bobina produce altos picos de potencia debido a una elevada di/dt estos picos son muy estrechos en el tiempo, por lo que la potencia final a disipar es pequeña. Las pérdidas de los sensores y otros elementos también se calcularon, pero resultaron insignificantes en comparación.



Tabla 4. Rendimiento y pérdidas en el Sistema MES-AES

Perdidas	Cálculo	Resultado
Perdidas en Diodo	$P_D = U_o I_m + p_D I_{ef}^2 + P_{conmutación}$	215
Perdidas en el IGBT	$P_{IGBT} = R_{sat} I_{ef}^2 + P_{conmutación}$	199
Pérdidas el SC	$P_{SC} = ESR \cdot I_{sc}^2 (I_m \approx I_{ef})$	1608
Pérdidas en Ls	$P_{Ls} = V_{Ls} \cdot I_{Ls}$	64
Perdidas en la batería	$P_{bat} = R_{int} \cdot I_{bat_{ef}}^2 (I_m \approx I_{ef})$	864
Pérdidas totales	$P_{Total} = P_D + P_{IGBT} + P_{SC} + P_{Ls} + P_{bat}$	3119
Potencia aceleración		75000
Rendimiento del Sistema MES-AES		96,07%

Como podemos ver en la Tabla 4, el sistema MES-AES tiene un rendimiento alto, superior al 95 %. A continuación calcularemos el rendimiento del sistema que utiliza exclusivamente las baterías para aportar energía al motor. Como vemos en los resultados de la Tabla 5, el rendimiento es casi un 10 % menor.

Tabla 5. Rendimiento y pérdidas en el sistema que utiliza exclusivamente las baterías

Sistema con baterías (sin supercondensador)	
I media (A)	197
Rint (Ω)	0,24
Perdidas (W)	9314
Rendimiento	87,58%

Por lo tanto, el rendimiento del sistema con supercondensador es superior. El sistema MES-AES utiliza mejor la energía en las aceleraciones, y también la regenera mejor en los frenados, reduciendo las pérdidas.

8. CONCLUSIONES

Sea cual sea el modo de funcionamiento actual, este no va a afectar significativamente a la aceleración y velocidad del vehículo, ya que en ningún caso vamos a limitar al motor. Sin embargo, el correcto uso de los modos de funcionamiento es importante, ya que sí van a afectar a la corriente y vida útil de las baterías. Como usuarios del vehículo eléctrico, para alargar la vida útil de las baterías de nuestro vehículo debemos:



- Conectar el Modo Escalada un tiempo antes de realizar una larga pendiente a velocidad media-alta o varios tramos de pendientes consecutivos.
- Conectar el Modo Deportivo al comenzar a circular por una vía rápida.
- Conectar el Modo Descenso antes (a ser posible) o durante tramos de descensos prolongados.

Es importante comentar que la mayor parte de los modos de funcionamiento se conectan y desconectan automáticamente, en función de la velocidad actual. El conductor no tiene que estar pendiente continuamente de ellos. El vehículo tampoco se vería severamente afectado si se les da un mal uso, ya que se desconectan y no pueden activarse en las situaciones en las que son innecesarios o nocivos. En resumen, se ha intentado implementar lo que vendría a ser un sistema a prueba de errores (el denominado poka-yoke, aunque en este caso se orienta al funcionamiento del sistema y no a su producción).

Continuando con esta idea, también se ha incluido una señal que informa al usuario de si la corriente por las baterías es la correcta (Figura 19), pudiéndose incluir una señal acústica, si fuese necesario. (Si se activase frecuentemente nos indicaría la necesidad de mantenimiento y reparaciones en el vehículo). Además, los nombres escogidos para los Modos de funcionamiento tratan de no dejar dudas sobre su utilidad. Otra forma adicional de conseguir una buena utilización de los modos de funcionamiento sería incluir una serie de directrices junto a los manuales que se proporcionan con la compra del vehículo.

Por otro lado, se ha comprobado que el sistema MES-AES diseñado no solo consigue limitar correctamente la corriente por las baterías alargando su vida útil, sino que también tiene un rendimiento superior. Esto se traduce en una autonomía ligeramente mayor para el vehículo eléctrico que lo utilice, así como un menor gasto económico en la tarifa eléctrica.

Por último, todas estas simulaciones han sido desarrolladas a través del ordenador. En el siguiente anexo, *DSP y Código del Programa de Control*, se desarrollará el código programa para el DSP elegido y se comprobará que las simulaciones arrojan el mismo resultado funcionando a través del DSP.

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ANEXO Nº12

APLICACIÓN PRÁCTICA:

DSP Y CÓDIGO DEL PROGRAMA DE CONTROL

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1. DSP ELEGIDO	2
2. CÓDIGO PROGRAMA DEL ALGORITMO DE CONTROL.....	3
3. CÓDIGO PROGRAMA PARA LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN AUXILIAR.....	19
4. VERIFICACIÓN DEL CÓDIGO DEL ALGORITMO DE CONTROL	22



1. DSP ELEGIDO

Las variables a muestrear son seis: tensión y corriente en el supercondensador, tensión y corriente de las baterías, velocidad y corriente del motor. Los impulsos para la modulación PWM se generan a una frecuencia que hemos fijado en 10 kHz. Para poder actualizar el valor del ciclo de trabajo varias veces por cada periodo necesitaremos un DSP con una frecuencia de muestreo de al menos 100 kHz.

Para ello tendremos que utilizar un conversor A/D tipo flash, o un DSP que incluya ese tipo de conversor. Sin embargo, a la hora de generar el código programa, la versión utilizada del programa PSIM solo nos permite elegir el DSP TI F28335 (de Texas Instruments). Este DSP cumple sobradamente la condición anterior, además incluye el multiplexor, el conversor A/D y una memoria flash para almacenar datos.

En el anexo N°10, *Desarrollo del algoritmo de control*, se explicó el funcionamiento del algoritmo de control para el sistema MES-AES. En el apartado 5 de ese anexo se detalla su implementación en PSIM (Figuras 13 a 25), que es un programa que permite desarrollar el sistema de control de forma gráfica.

Seleccionamos el DSP e introducimos en PSIM los bloques que simulan el conversor A/D (que toma las 6 entradas analógicas), así como los bloques para el reloj y las entradas y salidas digitales, obteniendo el resultado de la Figura 1.

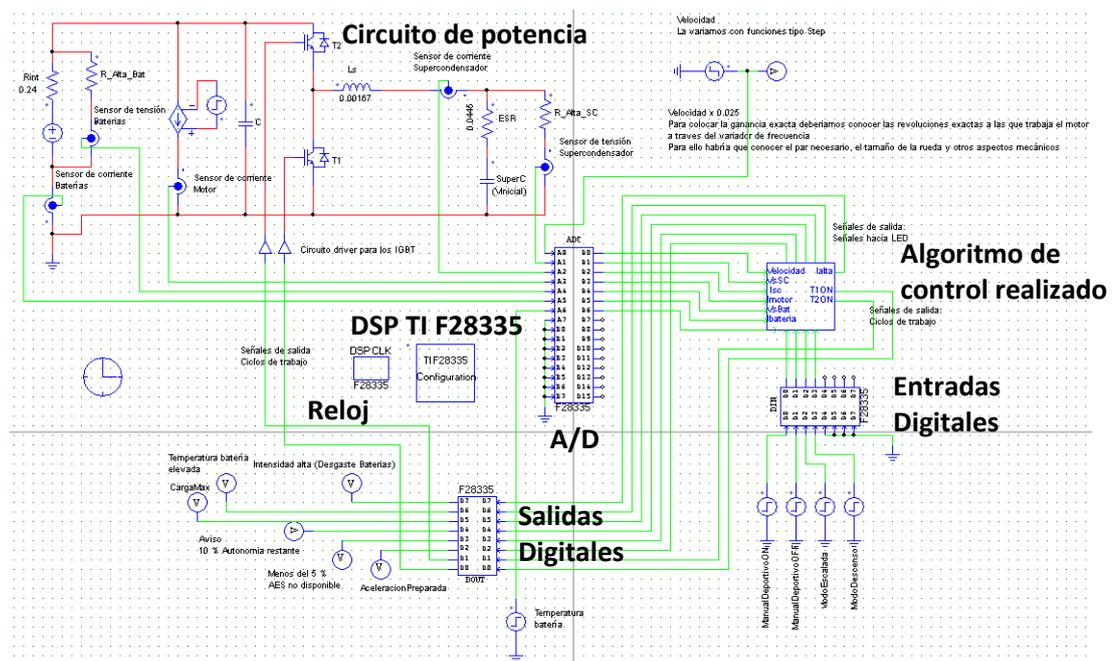


Figura 1. Circuito para la generación del código programa con PSIM



PSIM también nos permite configurar las entradas analógicas como AC o DC, seleccionar la posición de los pines de las entradas y salidas digitales, así como la frecuencia de trabajo del reloj (por defecto 150 MHz), como se puede ver en la Figura 2. Por otro lado, la frecuencia de muestro finalmente será de 100 kHz.

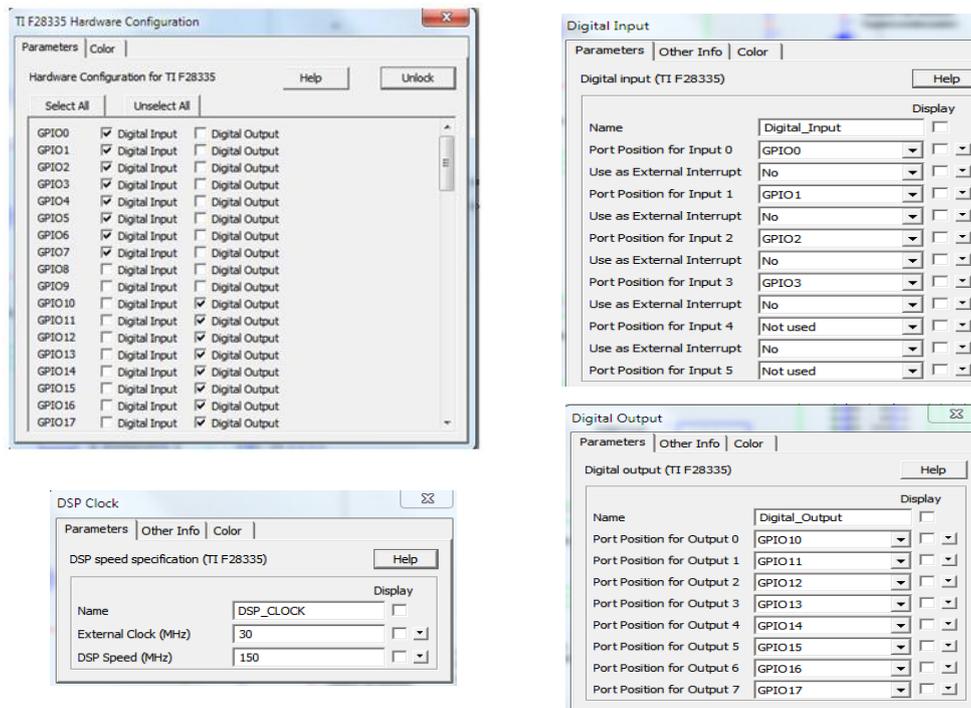


Figura 2. Configuración del reloj, entradas y salidas del DSP mediante PSIM

2. CÓDIGO PROGRAMA DEL ALGORITMO DE CONTROL

Una vez realizados todos los ajustes PSIM nos permite generar el código del programa realizado para el DSP elegido. El código programa en lenguaje C para el control del sistema MES-AES es el siguiente:

```
/*  
*****  
// This code is created by SimCoder Version 2.0 for F28335 Hardware Target  
//  
// SimCoder is copyright by Powersim Inc., 2009  
//  
// Date: May 13, 2014 19:55:11
```



```
*****
*****/
#include      <math.h>
#include      "PS_bios.h"
typedef float DefaultType;
#define GetCurTime() PS_GetSysTimer()

interrupt void Task();
void Task_1();
void TaskBloqueGeneral(DefaultType fln0, DefaultType fln1, DefaultType fln2, DefaultType
fln3, DefaultType fln4, DefaultType fln5, DefaultType fln6, DefaultType fln7, DefaultType
fln8, DefaultType fln9, DefaultType *fOut0, DefaultType *fOut1, DefaultType *fOut2,
DefaultType *fOut3, DefaultType *fOut4, DefaultType *fOut5, DefaultType *fOut6);
void TaskBloqueGeneral_1(DefaultType fln0, DefaultType *fOut0);
void TaskBloqueGeneral_BloqueMod_001(DefaultType fln0, DefaultType fln1, DefaultType
fln2, DefaultType fln3, DefaultType fln4, DefaultType *fOut0);
void TaskBloqueGeneral_BloqueLim_002(DefaultType fln0, DefaultType *fOut0,
DefaultType *fOut1, DefaultType *fOut2, DefaultType *fOut3);
void TaskBloqueGeneral_BloqueVSC(DefaultType fln0, DefaultType fln1, DefaultType
*fOut0, DefaultType *fOut1);
void TaskBloqueGeneral_BloqueInh_003(DefaultType fln0, DefaultType fln1, DefaultType
fln2, DefaultType *fOut0, DefaultType *fOut1);
void TaskBloqueGeneral_BloqueIno_004(DefaultType fln0, DefaultType fln1, DefaultType
fln2, DefaultType fln3, DefaultType fln4, DefaultType *fOut0);
void TaskBloqueGeneral_BloqueSignal(DefaultType fln0, DefaultType fln1, DefaultType
fln2, DefaultType fln3, DefaultType fln4, DefaultType fln5, DefaultType *fOut0);
void TaskBloqueGeneral_BloqueBateria(DefaultType fln0, DefaultType fln1, DefaultType
*fOut0, DefaultType *fOut1, DefaultType *fOut2, DefaultType *fOut3, DefaultType *fOut4);
void TaskBloqueGeneral_BloqueAceOK(DefaultType fln0, DefaultType fln1, DefaultType
*fOut0);
void TaskBloqueGeneral_BloqueIGBT(DefaultType fln0, DefaultType fln1, DefaultType fln2,
DefaultType *fOut0, DefaultType *fOut1);
void TaskBloqueGeneral_BloqueTem_005(DefaultType fln0, DefaultType *fOut0);

DefaultType fGblBloqueGeneral_BloqueTem_150 = 0.0;
typedef struct {
    unsigned long tmLow;
    unsigned long tmHigh;
} _CBigTime;
```



```
_CBigTime GetBigTime(void)
{
    static _CBigTime tm = {0,0};
    unsigned long curTime = GetCurTime();
    if (curTime < tm.tmLow)
        tm.tmHigh++;
    tm.tmLow = curTime;
    return tm;
}

interrupt void Task()
{
    DefaultType fConversorAD, fConversorAD_5, fConversorAD_4, fConversorAD_2,
fConversorAD_3;
    DefaultType fConversorAD_1, fDigital_Inputs, fDigital_Inputs_1, fDigital_Inputs_2,
fDigital_Inputs_3;
    DefaultType fFunVar27, fFunVar28, fFunVar29, fFunVar30, fFunVar35, fFunVar36,
fFunVar37;
    PS_EnableIntr();

    fConversorAD = PS_GetDcAdc(0);
    fConversorAD_5 = PS_GetAcAdc(5);
    fConversorAD_4 = PS_GetDcAdc(4);
    fConversorAD_2 = PS_GetAcAdc(2);
    fConversorAD_3 = PS_GetAcAdc(3);
    fConversorAD_1 = PS_GetDcAdc(1);
    fDigital_Inputs = (PS_GetDigitInA() & ((Uin32)1 << 0)) ? 1 : 0;
    fDigital_Inputs_1 = (PS_GetDigitInA() & ((Uin32)1 << 1)) ? 1 : 0;
    fDigital_Inputs_2 = (PS_GetDigitInA() & ((Uin32)1 << 2)) ? 1 : 0;
    fDigital_Inputs_3 = (PS_GetDigitInA() & ((Uin32)1 << 3)) ? 1 : 0;
    TaskBloqueGeneral(fConversorAD, fConversorAD_5, fConversorAD_4,
fConversorAD_2, fConversorAD_3, fConversorAD_1, fDigital_Inputs, fDigital_Inputs_1,
fDigital_Inputs_2, fDigital_Inputs_3, &fFunVar27, &fFunVar28, &fFunVar29, &fFunVar30,
&fFunVar35, &fFunVar36, &fFunVar37);

    (fFunVar35 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uin32)1 << 10) :
PS_SetDigitOutBitA((Uin32)1 << 10);
    (fFunVar36 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uin32)1 << 11) :
PS_SetDigitOutBitA((Uin32)1 << 11);
}
```



```
(fFunVar27 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 12) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 12);
(fFunVar30 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 13) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 13);
(fFunVar29 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 14) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 14);
(fFunVar28 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 15) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 15);
(fFunVar37 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 17) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 17);
    PS_ExitTimer1Intr();
}

void Task_1()
{
    DefaultType fConversorAD_6, fFunVar49;

    fConversorAD_6 = PS_GetDcAdc(6);
    TaskBloqueGeneral_1(fConversorAD_6, &fFunVar49);

    (fFunVar49 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 16) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 16);
}

void TaskBloqueGeneral(DefaultType fln0, DefaultType fln1, DefaultType fln2, DefaultType
fln3, DefaultType fln4, DefaultType fln5, DefaultType fln6, DefaultType fln7, DefaultType
fln8, DefaultType fln9, DefaultType *fOut0, DefaultType *fOut1, DefaultType *fOut2,
DefaultType *fOut3, DefaultType *fOut4, DefaultType *fOut5, DefaultType *fOut6)
{
    DefaultType fBloqueGeneral_Valor_I_sc, fBloqueGeneral_Valor_V_sc, fFunVar73,
fFunVar75;
    DefaultType fBloqueGeneral_P2, fFunVar67, fBloqueGeneral_RESTA_SOC_006,
fBloqueGeneral_Valor_I_Bat;
    DefaultType fBloqueGeneral_Valor_V_Bat, fFunVar82,
fBloqueGeneral_Valor_I_Motor, fFunVar69;
    DefaultType fFunVar70, fFunVar71, fFunVar72, fBloqueGeneral_Kp_PI_Error,
fBloqueGeneral_Ki_PI_Error;
    DefaultType fBloqueGeneral_Integra_P_007, fBloqueGeneral_SUM_PI_Error,
fFunVar81, fFunVar83;
    DefaultType fFunVar78, fFunVar79;
```



```
fBloqueGeneral_Valor_I_sc = fln3 * (1.0/0.005);
fBloqueGeneral_Valor_V_sc = fln5 * (1.0/0.00945);
TaskBloqueGeneral_BloqueVSC(fBloqueGeneral_Valor_I_sc,
fBloqueGeneral_Valor_V_sc, &fFunVar73, &fFunVar75);

fBloqueGeneral_P2 = fln0 * (1.0/0.025);
TaskBloqueGeneral_BloqueMod_001(fBloqueGeneral_P2, fln9, fln8, fln7, fln6,
&fFunVar67);

fBloqueGeneral_RESTA_SOC_006 = fFunVar67 - fFunVar73;
TaskBloqueGeneral_BloqueAceOK(fFunVar73, fBloqueGeneral_RESTA_SOC_006,
fOut0);

fBloqueGeneral_Valor_I_Bat = fln1 * (1.0/0.00756);
fBloqueGeneral_Valor_V_Bat = fln2 * (1.0/0.0067);
TaskBloqueGeneral_BloqueBateria(fBloqueGeneral_Valor_I_Bat,
fBloqueGeneral_Valor_V_Bat, &fFunVar82, fOut3, fOut2, fOut1, fOut6);

fBloqueGeneral_Valor_I_Motor = fln4 * (1.0/0.00756);
TaskBloqueGeneral_BloqueLim_002(fBloqueGeneral_Valor_I_Motor, &fFunVar69,
&fFunVar70, &fFunVar71, &fFunVar72);

fBloqueGeneral_Kp_PI_Error = fBloqueGeneral_RESTA_SOC_006 * (-10);
fBloqueGeneral_Ki_PI_Error = fBloqueGeneral_RESTA_SOC_006 * (-100);
{
    static DefaultType fBloqueGeneral_Integra_P_007_A = 0,
fBloqueGeneral_Ki_PI_Error_A = 0.0;
    fBloqueGeneral_Integra_P_007 = fBloqueGeneral_Integra_P_007_A +
0.5/100000 * (fBloqueGeneral_Ki_PI_Error + fBloqueGeneral_Ki_PI_Error_A);
    fBloqueGeneral_Integra_P_007_A =
fBloqueGeneral_Integra_P_007;fBloqueGeneral_Ki_PI_Error_A =
fBloqueGeneral_Ki_PI_Error;
}
fBloqueGeneral_SUM_PI_Error = fBloqueGeneral_Kp_PI_Error +
fBloqueGeneral_Integra_P_007;
TaskBloqueGeneral_BloqueIno_004(fFunVar75, fFunVar71, fFunVar70,
fBloqueGeneral_SUM_PI_Error, fFunVar82, &fFunVar81);
```



```
TaskBloqueGeneral_BloqueSignal(fBloqueGeneral_Valor_I_sc, fFunVar69,  
fFunVar72, fFunVar81, fFunVar82, fFunVar75, &fFunVar83);
```

```
TaskBloqueGeneral_BloqueInh_003(fFunVar75, fBloqueGeneral_RESTA_SOC_006,  
fFunVar69, &fFunVar78, &fFunVar79);
```

```
TaskBloqueGeneral_BloqueIGBT(fFunVar83, fFunVar78, fFunVar79, fOut5, fOut4);
```

```
}
```

```
void TaskBloqueGeneral_1(DefaultType fln0, DefaultType *fOut0)
```

```
{
```

```
TaskBloqueGeneral_BloqueTem_005(fl0, fOut0);
```

```
}
```

```
void TaskBloqueGeneral_BloqueMod_001(DefaultType fln0, DefaultType fln1, DefaultType  
fln2, DefaultType fln3, DefaultType fln4, DefaultType *fOut0)
```

```
{
```

```
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_008, fBloqueGeneral_BloqueMod_009,  
fBloqueGeneral_BloqueMod_010;
```

```
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_011, fBloqueGeneral_BloqueMod_030,  
fBloqueGeneral_BloqueMod_029;
```

```
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_040, fBloqueGeneral_BloqueMod_053,  
fBloqueGeneral_BloqueMod_033;
```

```
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_032, fBloqueGeneral_BloqueMod_052,  
fBloqueGeneral_BloqueMod_051;
```

```
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_050, fBloqueGeneral_BloqueMod_054,  
fBloqueGeneral_BloqueMod_058;
```

```
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_057, fBloqueGeneral_BloqueMod_056,  
fBloqueGeneral_BloqueMod_036;
```

```
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_031, fBloqueGeneral_BloqueMod_055,  
fBloqueGeneral_BloqueMod_041;
```

```
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_043, fBloqueGeneral_BloqueMod_034,  
fBloqueGeneral_BloqueMod_046;
```

```
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_026, fBloqueGeneral_BloqueMod_048,  
fBloqueGeneral_BloqueMod_047;
```

```
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_042, fBloqueGeneral_BloqueMod_013,  
fBloqueGeneral_BloqueMod_014;
```



```
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_015, fBloqueGeneral_BloqueMod_022,
fBloqueGeneral_BloqueMod_039;
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_016, fBloqueGeneral_BloqueMod_017,
fBloqueGeneral_BloqueMod_018;
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_023, fBloqueGeneral_BloqueMod_038,
fBloqueGeneral_BloqueMod_035;
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_027, fBloqueGeneral_BloqueMod_012,
fBloqueGeneral_BloqueMod_044;
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_049, fBloqueGeneral_BloqueMod_045,
fBloqueGeneral_BloqueMod_019;
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_020, fBloqueGeneral_BloqueMod_021,
fBloqueGeneral_BloqueMod_025;
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueMod_024, fBloqueGeneral_BloqueMod_037;

fBloqueGeneral_BloqueMod_008 = (-0.0058) * pow(fln0, 2);
fBloqueGeneral_BloqueMod_009 = fln0 * (-0.1411);
fBloqueGeneral_BloqueMod_010 = 99.596;
fBloqueGeneral_BloqueMod_011 = fBloqueGeneral_BloqueMod_008 * 1 +
fBloqueGeneral_BloqueMod_009 * 1 + fBloqueGeneral_BloqueMod_010 * 1;
fBloqueGeneral_BloqueMod_030 = 100.5;
fBloqueGeneral_BloqueMod_029 = (fln0 > fBloqueGeneral_BloqueMod_030) ? 1 :
0;
fBloqueGeneral_BloqueMod_040 = !fln2;
fBloqueGeneral_BloqueMod_053 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_029 != 0) &&
(fBloqueGeneral_BloqueMod_040 != 0);
fBloqueGeneral_BloqueMod_033 = 50;
fBloqueGeneral_BloqueMod_032 = (fln0 > fBloqueGeneral_BloqueMod_033) ? 1 :
0;
fBloqueGeneral_BloqueMod_052 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_032 != 0) &&
(fln4 != 0);
fBloqueGeneral_BloqueMod_051 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_053 != 0) ||
(fBloqueGeneral_BloqueMod_052 != 0);
fBloqueGeneral_BloqueMod_050 = !fBloqueGeneral_BloqueMod_032;
fBloqueGeneral_BloqueMod_054 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_050 != 0) || (fln3
!= 0) || (fln2 != 0);
fBloqueGeneral_BloqueMod_058 = !fBloqueGeneral_BloqueMod_054;
fBloqueGeneral_BloqueMod_057 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_051 != 0) &&
(fBloqueGeneral_BloqueMod_058 != 0);
fBloqueGeneral_BloqueMod_056 = !fBloqueGeneral_BloqueMod_057;
fBloqueGeneral_BloqueMod_036 = 70;
```



```
fBloqueGeneral_BloqueMod_031 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_036 > fln0) ? 1 :
0;
fBloqueGeneral_BloqueMod_055 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_040 != 0) &&
(fl1 != 0) && (fBloqueGeneral_BloqueMod_031 != 0);
fBloqueGeneral_BloqueMod_041 = !fBloqueGeneral_BloqueMod_055;
fBloqueGeneral_BloqueMod_043 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_056 != 0) &&
(fBloqueGeneral_BloqueMod_040 != 0) && (fBloqueGeneral_BloqueMod_041 != 0);
fBloqueGeneral_BloqueMod_034 = fBloqueGeneral_BloqueMod_011 *
fBloqueGeneral_BloqueMod_043;
fBloqueGeneral_BloqueMod_046 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_056 != 0) &&
(fBloqueGeneral_BloqueMod_040 != 0) && (fBloqueGeneral_BloqueMod_041 != 0);
fBloqueGeneral_BloqueMod_026 = 1;
fBloqueGeneral_BloqueMod_048 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_046 != 0) &&
(fBloqueGeneral_BloqueMod_026 != 0);
fBloqueGeneral_BloqueMod_047 = !fBloqueGeneral_BloqueMod_048;
fBloqueGeneral_BloqueMod_042 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_047 != 0) &&
(fBloqueGeneral_BloqueMod_040 != 0) && (fBloqueGeneral_BloqueMod_041 != 0);
fBloqueGeneral_BloqueMod_013 = (-0.0093) * pow(fl1, 2);
fBloqueGeneral_BloqueMod_014 = fl1 * 0.5577;
fBloqueGeneral_BloqueMod_015 = 95.021;
fBloqueGeneral_BloqueMod_022 = fBloqueGeneral_BloqueMod_013 * 1 +
fBloqueGeneral_BloqueMod_014 * 1 + fBloqueGeneral_BloqueMod_015 * 1;
fBloqueGeneral_BloqueMod_039 = fBloqueGeneral_BloqueMod_042 *
fBloqueGeneral_BloqueMod_022;
fBloqueGeneral_BloqueMod_016 = (-0.0062) * pow(fl1, 2);
fBloqueGeneral_BloqueMod_017 = fl1 * (-0.4431);
fBloqueGeneral_BloqueMod_018 = 90.4;
fBloqueGeneral_BloqueMod_023 = fBloqueGeneral_BloqueMod_016 * 1 +
fBloqueGeneral_BloqueMod_017 * 1 + fBloqueGeneral_BloqueMod_018 * 1;
fBloqueGeneral_BloqueMod_038 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_047 != 0) &&
(fBloqueGeneral_BloqueMod_056 != 0) && (fBloqueGeneral_BloqueMod_040 != 0);
fBloqueGeneral_BloqueMod_035 = fBloqueGeneral_BloqueMod_023 *
fBloqueGeneral_BloqueMod_038;
fBloqueGeneral_BloqueMod_027 = fBloqueGeneral_BloqueMod_034 * 1 +
fBloqueGeneral_BloqueMod_039 * 1 + fBloqueGeneral_BloqueMod_035 * 1;
fBloqueGeneral_BloqueMod_012 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_027 > 100) ? 100
: ((fBloqueGeneral_BloqueMod_027 < 30) ? 30 : fBloqueGeneral_BloqueMod_027);
fBloqueGeneral_BloqueMod_044 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_056 != 0) &&
(fBloqueGeneral_BloqueMod_047 != 0) && (fBloqueGeneral_BloqueMod_041 != 0);
fBloqueGeneral_BloqueMod_049 = !fBloqueGeneral_BloqueMod_044;
```



```
fBloqueGeneral_BloqueMod_045 = fBloqueGeneral_BloqueMod_012 *
fBloqueGeneral_BloqueMod_049;
fBloqueGeneral_BloqueMod_019 = (-0.0067) * pow(fIn0, 2);
fBloqueGeneral_BloqueMod_020 = fIn0 * 0.1352;
fBloqueGeneral_BloqueMod_021 = 99.682;
fBloqueGeneral_BloqueMod_025 = fBloqueGeneral_BloqueMod_019 * 1 +
fBloqueGeneral_BloqueMod_020 * 1 + fBloqueGeneral_BloqueMod_021 * 1;
fBloqueGeneral_BloqueMod_024 = (fBloqueGeneral_BloqueMod_025 > 100) ? 100
: ((fBloqueGeneral_BloqueMod_025 < 90) ? 90 : fBloqueGeneral_BloqueMod_025);
fBloqueGeneral_BloqueMod_037 = fBloqueGeneral_BloqueMod_044 *
fBloqueGeneral_BloqueMod_024;
*fOut0 = fBloqueGeneral_BloqueMod_045 + fBloqueGeneral_BloqueMod_037;
}

void TaskBloqueGeneral_BloqueIno_004(DefaultType fIn0, DefaultType fIn1, DefaultType
fIn2, DefaultType fIn3, DefaultType fIn4, DefaultType *fOut0)
{
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueIno_095, fBloqueGeneral_BloqueIno_098,
fBloqueGeneral_BloqueIno_096;
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueIno_092, fBloqueGeneral_BloqueIno_097,
fBloqueGeneral_BloqueIno_093;

    fBloqueGeneral_BloqueIno_095 = fIn0 / fIn4;
    fBloqueGeneral_BloqueIno_098 = fIn3 * fBloqueGeneral_BloqueIno_095;
    fBloqueGeneral_BloqueIno_096 = (fBloqueGeneral_BloqueIno_098 > 100) ? 100 :
((fBloqueGeneral_BloqueIno_098 < -40) ? -40 : fBloqueGeneral_BloqueIno_098);
    fBloqueGeneral_BloqueIno_092 = fBloqueGeneral_BloqueIno_096 * fIn2;
    fBloqueGeneral_BloqueIno_097 = (fBloqueGeneral_BloqueIno_098 > 40) ? 40 :
((fBloqueGeneral_BloqueIno_098 < -100) ? -100 : fBloqueGeneral_BloqueIno_098);
    fBloqueGeneral_BloqueIno_093 = fBloqueGeneral_BloqueIno_097 * fIn1;
    *fOut0 = fBloqueGeneral_BloqueIno_092 + fBloqueGeneral_BloqueIno_093;
}

void TaskBloqueGeneral_BloqueSignal(DefaultType fIn0, DefaultType fIn1, DefaultType
fIn2, DefaultType fIn3, DefaultType fIn4, DefaultType fIn5, DefaultType *fOut0)
{
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueSig_114, fBloqueGeneral_BloqueSig_100,
fBloqueGeneral_BloqueSig_105;
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueSig_116, fBloqueGeneral_BloqueSig_112,
fBloqueGeneral_BloqueSig_099;
```



```
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueSig_107, fBloqueGeneral_BloqueSig_110,
fBloqueGeneral_BloqueSig_111;
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueSig_108, fBloqueGeneral_BloqueSig_101,
fBloqueGeneral_BloqueSig_106;
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueSig_115, fBloqueGeneral_BloqueSig_109,
fBloqueGeneral_BloqueSig_113;
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueSig_103, fBloqueGeneral_BloqueSig_102;

fBloqueGeneral_BloqueSig_114 = fln3 * fln1;
fBloqueGeneral_BloqueSig_100 = fBloqueGeneral_BloqueSig_114 + fln2;
fBloqueGeneral_BloqueSig_105 = fln4 / fln5;
fBloqueGeneral_BloqueSig_116 = fBloqueGeneral_BloqueSig_100 *
fBloqueGeneral_BloqueSig_105;
fBloqueGeneral_BloqueSig_112 = (fBloqueGeneral_BloqueSig_116 > 210) ? 210 :
((fBloqueGeneral_BloqueSig_116 < -210) ? -210 : fBloqueGeneral_BloqueSig_116);
fBloqueGeneral_BloqueSig_099 = fBloqueGeneral_BloqueSig_112 - fln0;
fBloqueGeneral_BloqueSig_107 = fBloqueGeneral_BloqueSig_099 * 0.3;
fBloqueGeneral_BloqueSig_110 = fBloqueGeneral_BloqueSig_099 * 3;
{
    static DefaultType fBloqueGeneral_BloqueSig_111_A = 0,
fBloqueGeneral_BloqueSig_110_A = 0.0;
    fBloqueGeneral_BloqueSig_111 = fBloqueGeneral_BloqueSig_111_A +
0.5/100000 * (fBloqueGeneral_BloqueSig_110 + fBloqueGeneral_BloqueSig_110_A);
    fBloqueGeneral_BloqueSig_111_A =
fBloqueGeneral_BloqueSig_111;fBloqueGeneral_BloqueSig_110_A
fBloqueGeneral_BloqueSig_110;
}
fBloqueGeneral_BloqueSig_108 = fBloqueGeneral_BloqueSig_107 +
fBloqueGeneral_BloqueSig_111;
fBloqueGeneral_BloqueSig_101 = fBloqueGeneral_BloqueSig_108 * fln1;
fBloqueGeneral_BloqueSig_106 = fBloqueGeneral_BloqueSig_099 * 0.075;
fBloqueGeneral_BloqueSig_115 = fBloqueGeneral_BloqueSig_099 * 0.75;
{
    static DefaultType fBloqueGeneral_BloqueSig_109_A = 0,
fBloqueGeneral_BloqueSig_115_A = 0.0;
    fBloqueGeneral_BloqueSig_109 = fBloqueGeneral_BloqueSig_109_A +
0.5/100000 * (fBloqueGeneral_BloqueSig_115 + fBloqueGeneral_BloqueSig_115_A);
    fBloqueGeneral_BloqueSig_109_A =
fBloqueGeneral_BloqueSig_109;fBloqueGeneral_BloqueSig_115_A
fBloqueGeneral_BloqueSig_115;
```



```
    }
    fBloqueGeneral_BloqueSig_113    =    fBloqueGeneral_BloqueSig_106    +
fBloqueGeneral_BloqueSig_109;
    fBloqueGeneral_BloqueSig_103 = !fIn1;
    fBloqueGeneral_BloqueSig_102    =    fBloqueGeneral_BloqueSig_113    *
fBloqueGeneral_BloqueSig_103;
    *fOut0 = fBloqueGeneral_BloqueSig_101 + fBloqueGeneral_BloqueSig_102;
}

void TaskBloqueGeneral_BloqueIGBT(DefaultType fIn0, DefaultType fIn1, DefaultType fIn2,
DefaultType *fOut0, DefaultType *fOut1)
{
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueIGB_139, fBloqueGeneral_BloqueIGB_137,
fBloqueGeneral_BloqueIGB_140;
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueIGB_138;

    {
        static unsigned long period = (unsigned long)(150000000L / 10000);
        static float fPeriod = ((float)10000) / 150000000L;
        static _CBigTime tmCarrierStart = {0, 0};
        _CBigTime tm = GetBigTime();
        unsigned long tmp1, tmp2;
        tmp1 = tm.tmLow - tmCarrierStart.tmLow;
        tmp2 = tm.tmHigh - tmCarrierStart.tmHigh;
        if (tm.tmLow > tmCarrierStart.tmLow)
            tmp2++;
        if (tmp2 || (!tmp2 && (tmp1 >= period))) {
            tmp1 = tmCarrierStart.tmLow + period;
            if ((tmp1 < tmCarrierStart.tmLow) || (tmp1 < period))
                tmCarrierStart.tmHigh++;
            tmCarrierStart.tmLow = tmp1;
        }
        tmp1 = tm.tmLow - tmCarrierStart.tmLow;
        fBloqueGeneral_BloqueIGB_139 = 15 * tmp1 * fPeriod;
    }
    fBloqueGeneral_BloqueIGB_137 = (fIn0 > fBloqueGeneral_BloqueIGB_139) ? 1 : 0;
    *fOut1 = fBloqueGeneral_BloqueIGB_137 * fIn2;
    {
        static unsigned long period = (unsigned long)(150000000L / 10000);
        static float fPeriod = ((float)10000) / 150000000L;
```



```
static _CBigTime tmCarrierStart = {0, 0};
_CBigTime tm = GetBigTime();
unsigned long tmp1, tmp2;
tmp1 = tm.tmLow - tmCarrierStart.tmLow;
tmp2 = tm.tmHigh - tmCarrierStart.tmHigh;
if (tm.tmLow > tmCarrierStart.tmLow)
    tmp2++;
if (tmp2 || (!tmp2 && (tmp1 >= period))) {
    tmp1 = tmCarrierStart.tmLow + period;
    if ((tmp1 < tmCarrierStart.tmLow) || (tmp1 < period))
        tmCarrierStart.tmHigh++;
    tmCarrierStart.tmLow = tmp1;
}
tmp1 = tm.tmLow - tmCarrierStart.tmLow;
fBloqueGeneral_BloqueIGB_140 = 15 * tmp1 * fPeriod;
}
fBloqueGeneral_BloqueIGB_138 = (fBloqueGeneral_BloqueIGB_140 > fln0) ? 1 : 0;
*fOut0 = fBloqueGeneral_BloqueIGB_138 * fln1;
}

void TaskBloqueGeneral_BloqueInh_003(DefaultType fln0, DefaultType fln1, DefaultType
fln2, DefaultType *fOut0, DefaultType *fOut1)
{
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueInh_078, fBloqueGeneral_BloqueInh_079,
fBloqueGeneral_BloqueInh_091;
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueInh_089, fBloqueGeneral_BloqueInh_086,
fBloqueGeneral_BloqueInh_088;
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueInh_087, fBloqueGeneral_BloqueInh_090,
fBloqueGeneral_BloqueInh_085;
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueInh_081, fBloqueGeneral_BloqueInh_080,
fBloqueGeneral_BloqueInh_084;

    fBloqueGeneral_BloqueInh_078 = 307.8;
    fBloqueGeneral_BloqueInh_079 = (fBloqueGeneral_BloqueInh_078 > fln0) ? 1 : 0;
    fBloqueGeneral_BloqueInh_091 = !fln2;
    fBloqueGeneral_BloqueInh_089 = -1;
    fBloqueGeneral_BloqueInh_086 = (fln1 > fBloqueGeneral_BloqueInh_089) ? 1 : 0;
    fBloqueGeneral_BloqueInh_088 = 1;
    fBloqueGeneral_BloqueInh_087 = (fBloqueGeneral_BloqueInh_088 > fln1) ? 1 : 0;
```



```
fBloqueGeneral_BloqueInh_090 = (fBloqueGeneral_BloqueInh_086 == 0) ||
(fBloqueGeneral_BloqueInh_087 == 0);
fBloqueGeneral_BloqueInh_085 = (fBloqueGeneral_BloqueInh_091 != 0) ||
(fBloqueGeneral_BloqueInh_090 != 0);
*fOut0 = (fBloqueGeneral_BloqueInh_079 != 0) &&
(fBloqueGeneral_BloqueInh_085 != 0);
fBloqueGeneral_BloqueInh_081 = 170;
fBloqueGeneral_BloqueInh_080 = (fIn0 > fBloqueGeneral_BloqueInh_081) ? 1 : 0;
fBloqueGeneral_BloqueInh_084 = (fBloqueGeneral_BloqueInh_090 != 0) ||
(fBloqueGeneral_BloqueInh_091 != 0);
*fOut1 = (fBloqueGeneral_BloqueInh_080 != 0) &&
(fBloqueGeneral_BloqueInh_084 != 0);
}

void TaskBloqueGeneral_BloqueAceOK(DefaultType fIn0, DefaultType fIn1, DefaultType
*fOut0)
{
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueAce_133, fBloqueGeneral_BloqueAce_132,
fBloqueGeneral_BloqueAce_135;
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueAce_134;

    fBloqueGeneral_BloqueAce_133 = 10;
    fBloqueGeneral_BloqueAce_132 = (fBloqueGeneral_BloqueAce_133 > fIn1) ? 1 : 0;
    fBloqueGeneral_BloqueAce_135 = 45;
    fBloqueGeneral_BloqueAce_134 = (fIn0 > fBloqueGeneral_BloqueAce_135) ? 1 : 0;
    *fOut0 = (fBloqueGeneral_BloqueAce_132 != 0) &&
(fBloqueGeneral_BloqueAce_134 != 0);
}

void TaskBloqueGeneral_BloqueVSC(DefaultType fIn0, DefaultType fIn1, DefaultType
*fOut0, DefaultType *fOut1)
{
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueVSC_073, fBloqueGeneral_BloqueVSC_074,
fBloqueGeneral_BloqueVSC_075;

    fBloqueGeneral_BloqueVSC_073 = fIn0 * 0.0445;
    *fOut1 = fIn1 + fBloqueGeneral_BloqueVSC_073;
    fBloqueGeneral_BloqueVSC_074 = 1 * pow(*fOut1, 2);
    fBloqueGeneral_BloqueVSC_075 = fBloqueGeneral_BloqueVSC_074 * 13.15;
    *fOut0 = fBloqueGeneral_BloqueVSC_075 * (8.025E-5);
}
```



```
}

void TaskBloqueGeneral_BloqueLim_002(DefaultType fln0, DefaultType *fOut0,
DefaultType *fOut1, DefaultType *fOut2, DefaultType *fOut3)
{
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueLim_068, fBloqueGeneral_BloqueLim_065,
fBloqueGeneral_BloqueLim_064;
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueLim_072, fBloqueGeneral_BloqueLim_059,
fBloqueGeneral_BloqueLim_062;
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueLim_063, fBloqueGeneral_BloqueLim_071,
fBloqueGeneral_BloqueLim_066;
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueLim_067;

    fBloqueGeneral_BloqueLim_068 = -60;
    fBloqueGeneral_BloqueLim_065 = fln0 - fBloqueGeneral_BloqueLim_068;
    fBloqueGeneral_BloqueLim_064 = (0 > fBloqueGeneral_BloqueLim_065) ? 1 : 0;
    fBloqueGeneral_BloqueLim_072 = !fBloqueGeneral_BloqueLim_064;
    fBloqueGeneral_BloqueLim_059 = 60;
    fBloqueGeneral_BloqueLim_062 = fln0 - fBloqueGeneral_BloqueLim_059;
    fBloqueGeneral_BloqueLim_063 = (fBloqueGeneral_BloqueLim_062 > 0) ? 1 : 0;
    fBloqueGeneral_BloqueLim_071 = !fBloqueGeneral_BloqueLim_063;
    *fOut0 = (fBloqueGeneral_BloqueLim_072 != 0) &&
(fBloqueGeneral_BloqueLim_071 != 0);
    *fOut1 = (fln0 > 0) ? 1 : 0;
    *fOut2 = (0 > fln0) ? 1 : 0;
    fBloqueGeneral_BloqueLim_066 = fBloqueGeneral_BloqueLim_063 *
fBloqueGeneral_BloqueLim_062;
    fBloqueGeneral_BloqueLim_067 = fBloqueGeneral_BloqueLim_064 *
fBloqueGeneral_BloqueLim_065;
    *fOut3 = fBloqueGeneral_BloqueLim_066 + fBloqueGeneral_BloqueLim_067;
}

void TaskBloqueGeneral_BloqueBateria(DefaultType fln0, DefaultType fln1, DefaultType
*fOut0, DefaultType *fOut1, DefaultType *fOut2, DefaultType *fOut3, DefaultType *fOut4)
{
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueBat_127, fBloqueGeneral_BloqueBat_126,
fBloqueGeneral_BloqueBat_125;
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueBat_128, fBloqueGeneral_BloqueBat_129,
fBloqueGeneral_BloqueBat_130;
```



```
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueBat_117, fBloqueGeneral_BloqueBat_120,
fBloqueGeneral_BloqueBat_121;
DefaultType fBloqueGeneral_BloqueBat_123;

fBloqueGeneral_BloqueBat_127 = 66;
{
    static DefaultType fBloqueGeneral_BloqueBat_126_A = 0, fln0_A = 0.0;
    fBloqueGeneral_BloqueBat_126 = fBloqueGeneral_BloqueBat_126_A +
0.5/100000 * (fln0 + fln0_A);
    fBloqueGeneral_BloqueBat_126_A =
fBloqueGeneral_BloqueBat_126;fln0_A = fln0;
}
fBloqueGeneral_BloqueBat_125 = fBloqueGeneral_BloqueBat_126 * (1.0/3600);
fBloqueGeneral_BloqueBat_128 = fBloqueGeneral_BloqueBat_127 -
fBloqueGeneral_BloqueBat_125;
fBloqueGeneral_BloqueBat_129 = fBloqueGeneral_BloqueBat_128 * 1.51515;
fBloqueGeneral_BloqueBat_130 = 99.9;
*fOut3 = (fBloqueGeneral_BloqueBat_129 > fBloqueGeneral_BloqueBat_130) ? 1 :
0;
fBloqueGeneral_BloqueBat_117 = 10;
*fOut2 = (fBloqueGeneral_BloqueBat_117 > fBloqueGeneral_BloqueBat_129) ? 1 :
0;
fBloqueGeneral_BloqueBat_120 = 307.8;
fBloqueGeneral_BloqueBat_121 = fln0 * 0.24;
*fOut0 = fln1 + fBloqueGeneral_BloqueBat_121;
*fOut1 = (fBloqueGeneral_BloqueBat_120 > *fOut0) ? 1 : 0;
fBloqueGeneral_BloqueBat_123 = 120;
*fOut4 = (fln0 > fBloqueGeneral_BloqueBat_123) ? 1 : 0;
}

void TaskBloqueGeneral_BloqueTem_005(DefaultType fln0, DefaultType *fOut0)
{
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueTem_143, fBloqueGeneral_BloqueTem_144,
fBloqueGeneral_BloqueTem_145;
    DefaultType fBloqueGeneral_BloqueTem_146, fBloqueGeneral_BloqueTem_147,
fBloqueGeneral_BloqueTem_149;

    fBloqueGeneral_BloqueTem_143 = 100;
    fBloqueGeneral_BloqueTem_144 = fBloqueGeneral_BloqueTem_143 * 0.001;
    fBloqueGeneral_BloqueTem_145 = fBloqueGeneral_BloqueTem_144 * (470.0/27);
```



```
fBloqueGeneral_BloqueTem_146 = fIn0 - fBloqueGeneral_BloqueTem_145;
fBloqueGeneral_BloqueTem_147 = fBloqueGeneral_BloqueTem_146 *
(1.0/0.0067);
fBloqueGeneral_BloqueTem_149 = 70;
*fOut0 = (fBloqueGeneral_BloqueTem_147 > fBloqueGeneral_BloqueTem_149) ? 1
: 0;
#ifdef _DEBUG
fGblBloqueGeneral_BloqueTem_150 = fBloqueGeneral_BloqueTem_147;
#endif
}

void Initialize(void)
{
    PS_SysInit(30, 10);
    PS_InitTimer(0, 0xffffffff);
    PS_ResetAdcConvSeq();
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 0, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 1, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 2, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 3, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 4, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 5, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 6, 1.0);
    PS_Adclnit(0, !0);

    PS_InitDigitIn(0, 100);
    PS_InitDigitIn(1, 100);
    PS_InitDigitIn(2, 100);
    PS_InitDigitIn(3, 100);

    PS_InitDigitOut(10);
    PS_InitDigitOut(11);
    PS_InitDigitOut(12);
    PS_InitDigitOut(13);
    PS_InitDigitOut(14);
    PS_InitDigitOut(15);
    PS_InitDigitOut(16);
    PS_InitDigitOut(17);

    PS_InitTimer(1,10);
```



```
        PS_SetTimerIntrVector(1, Task);
    }

void main()
{
    Initialize();
    PS_EnableIntr(); // Enable Global interrupt INTM
    PS_EnableDbgm();
    for (;;) {
        Task_1();
    }
}
```

3. CÓDIGO PROGRAMA PARA LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN AUXILIAR

Según el anexo N°14, *Fuente de alimentación auxiliar*, para alimentar los elementos del sistema de control (sensores hall, operacionales, etc.) es necesario un convertidor CC/CC con transformador. Este convertidor CC/CC emplea un convertidor CC/CA para alimentar el primario del transformador a partir de la energía CC de la batería.

Para ello, los IGBT denominados T3 y T4 del convertidor CC/CA se controlan mediante una onda cuadrada de 20 kHz que debemos generar con el DSP. Siguiendo el mismo procedimiento anterior de las Figuras 1 y 2 configuramos los pines de salida para T3 y T4 y generamos el código programa:

```
void Task();

typedef struct {
    unsigned long tmLow;
    unsigned long tmHigh;
} _CBigTime;

_CBigTime GetBigTime(void)
{
    static _CBigTime tm = {0,0};
    unsigned long curTime = GetCurTime();
    if (curTime < tm.tmLow)
```



```
        tm.tmHigh++;
    tm.tmLow = curTime;
    return tm;
}

void Task()
{
    DefaultType fGeneradorPWM_T3, fCicloTrabajo, fCOMP_T3, fGeneradorPWM_T4,
    fCOMP_T4;

    {
        static unsigned long period = (unsigned long)(150000000L / 20000);
        static float fPeriod = ((float)20000) / 150000000L;
        static _CBigTime tmCarrierStart = {0, 0};
        _CBigTime tm = GetBigTime();
        unsigned long tmp1, tmp2;
        tmp1 = tm.tmLow - tmCarrierStart.tmLow;
        tmp2 = tm.tmHigh - tmCarrierStart.tmHigh;
        if (tm.tmLow > tmCarrierStart.tmLow)
            tmp2++;
        if (tmp2 || (!tmp2 && (tmp1 >= period))) {
            tmp1 = tmCarrierStart.tmLow + period;
            if ((tmp1 < tmCarrierStart.tmLow) || (tmp1 < period))
                tmCarrierStart.tmHigh++;
            tmCarrierStart.tmLow = tmp1;
        }
        tmp1 = tm.tmLow - tmCarrierStart.tmLow;
        fGeneradorPWM_T3 = 1 * tmp1 * fPeriod;
    }
    fCicloTrabajo = 0.5;
    fCOMP_T3 = (fGeneradorPWM_T3 > fCicloTrabajo) ? 1 : 0;
    {
        static unsigned long period = (unsigned long)(150000000L / 20000);
        static float fPeriod = ((float)20000) / 150000000L;
        static _CBigTime tmCarrierStart = {0, 0};
        _CBigTime tm = GetBigTime();
        unsigned long tmp1, tmp2;
        tmp1 = tm.tmLow - tmCarrierStart.tmLow;
        tmp2 = tm.tmHigh - tmCarrierStart.tmHigh;
        if (tm.tmLow > tmCarrierStart.tmLow)
```



```
        tmp2++;
    if (tmp2 || (!tmp2 && (tmp1 >= period))) {
        tmp1 = tmCarrierStart.tmLow + period;
        if ((tmp1 < tmCarrierStart.tmLow) || (tmp1 < period))
            tmCarrierStart.tmHigh++;
        tmCarrierStart.tmLow = tmp1;
    }
    tmp1 = tm.tmLow - tmCarrierStart.tmLow;
    fGeneradorPWM_T4 = 1 * tmp1 * fPeriod;
}
fCOMP_T4 = (fCicloTrabajo > fGeneradorPWM_T4) ? 1 : 0;
(fCOMP_T3 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 8) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 8);
(fCOMP_T4 == 0) ? PS_ClearDigitOutBitA((Uint32)1 << 9) :
PS_SetDigitOutBitA((Uint32)1 << 9);
}

void Initialize(void)
{
    PS_SysInit(30, 10);
    PS_InitTimer(0, 0xffffffff);
    PS_InitDigitOut(8);
    PS_InitDigitOut(9);
}

void main()
{
    Initialize();
    PS_EnableIntr(); // Enable Global interrupt INTM
    PS_EnableDbgm();
    for (;;) {
        Task();
    }
}
```



4. VERIFICACIÓN DEL CÓDIGO DEL ALGORITMO DE CONTROL

Para verificar el código generado compararemos simulaciones realizadas antes y después de añadir los bloques que simulan el DSP (convertor A/D, bloques de entradas y salidas digitales y reloj). Para ello emplearemos la simulación del apartado 2.1 del anexo N°11, *Simulaciones y validación del algoritmo*, que consistía en una aceleración 40-100 km/h en 7 segundos.

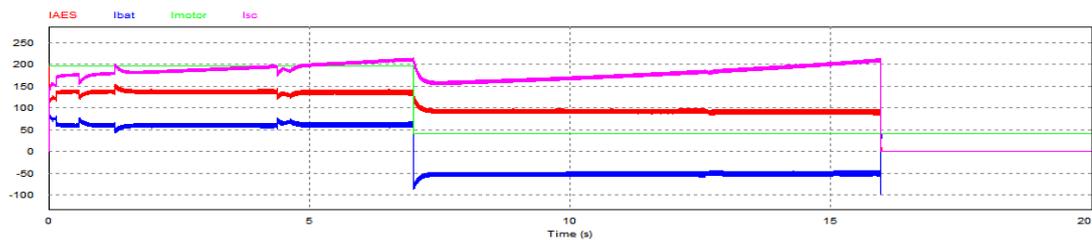


Figura 3. Simulación realizada en PSIM antes de generar el código

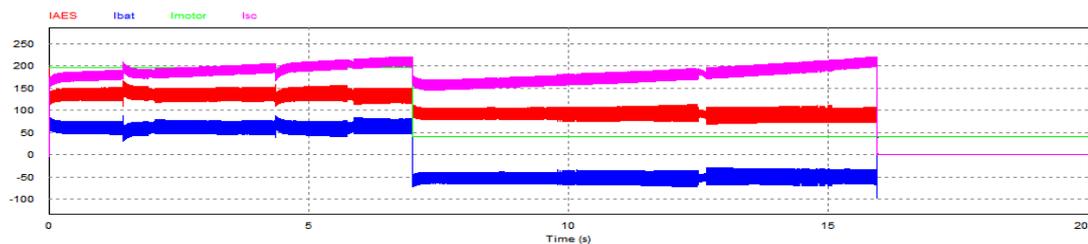


Figura 4. Simulación realizada en PSIM utilizando el código generado. Frecuencia de muestreo inferior de 10 kHz (el rizado aumenta, emplearemos una frecuencia superior)

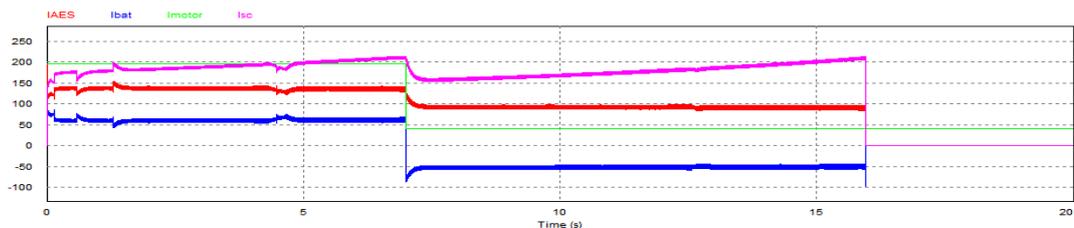


Figura 5. Simulación realizada en PSIM utilizando el código generado. Frecuencia de muestreo final de 100 kHz

Como podemos ver, utilizando una frecuencia de muestreo de 100 kHz el resultado de la simulación realizada a través de nuestro DSP utilizando el código generado (Figura 5) es prácticamente igual a la simulación de la Figura 3 (en ese caso PSIM simulaba desde el ordenador, sin haber seleccionado ningún DSP concreto).

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ANEXO N°13

APLICACIÓN PRÁCTICA:

CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO Y CONTROL

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1.	INTRODUCCIÓN. SEÑALES DE ENTRADA ANALÓGICAS.....	2
2.	MEDIDA DE LA CORRIENTE: MOTOR, SUPERCONDENSADOR Y BATERÍAS	2
2.1.	Eficiencia del circuito de acondicionamiento	6
3.	MEDIDA DE LA TENSIÓN: SUPERCONDENSADOR Y BATERÍAS.....	6
4.	MEDIDA DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR	9
5.	MEDIDA DE LA TEMPERATURA EN LA BATERÍA	11
6.	LOCALIZACIÓN DE LOS SENSORES.....	14
7.	CIRCUITO DE CONTROL (DSP)	15
8.	ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE SALIDA	16
8.1.	Diodos LED	16
8.2.	Driver para el módulo IGBT.....	17
9.	CONCLUSIONES.....	19



1. INTRODUCCIÓN. SEÑALES DE ENTRADA ANALÓGICAS

En este anexo se diseñan los circuitos necesarios para acondicionar las señales de entrada y salida. Para controlar el sistema necesitamos adquirir las siguientes señales de entrada analógicas:

- Corriente en el supercondensador, baterías y motor.
- Tensión en el supercondensador y baterías.
- Velocidad del motor y temperatura de la batería.

Para adquirir estas variables, necesitaremos los sensores correspondientes y circuitos que adapten estas señales al rango de entrada del convertor A/D del DSP, para que posteriormente puedan ser utilizadas por el sistema de control, como se ve en el esquema de la Figura 1.



Figura 1. Circuito de acondicionamiento de señal de entrada. Esquema general

A continuación explicaremos los elementos necesarios para realizar todas estas mediciones.

2. MEDIDA DE LA CORRIENTE: MOTOR, SUPERCONDENSADOR Y BATERÍAS

Debido a la banda de corriente establecida, necesitamos tomar la corriente del motor y del supercondensador. A partir de estas medidas impediremos que la corriente de las baterías alcance valores superiores a 60 A.

También se necesita medir la corriente por la batería, con el objetivo de conocer su estado de carga (Ah) y la autonomía restante. El cálculo de los Ah consumidos y la carga restante ha sido realizado mediante programa.

Por lo tanto, necesitaremos medir 3 corrientes. Para ello podemos utilizar diferentes métodos, que se comparan en la Tabla 1 del anexo N°9, *Análisis de las estrategias de control*. Para simplificar y ya que las 3 medidas son de un orden similar, utilizaremos el mismo método de medición.



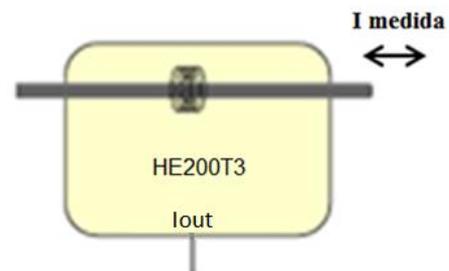
El método más sencillo consiste en utilizar una resistencia en serie de un valor pequeño, midiendo la caída de tensión entre sus extremos. Sin embargo, este método es poco eficiente, como se calcula posteriormente en las ecuaciones 2.1 y 2.2. En este caso, nosotros estamos buscando obtener la mayor eficiencia posible, para que la autonomía del vehículo sea máxima.

Por ello utilizaremos un sensor de efecto hall. Aunque es un método más caro, es más eficiente y además nos proporciona el aislamiento necesario entre el circuito de potencia y el de control, sin necesidad de elementos adicionales, por lo que nos permitirá ahorrarnos un amplificador de aislamiento.

Podría seleccionarse un sensor hall diferente para cada medición. Sin embargo como todas las corrientes tienen un orden similar hemos optado por seleccionar un solo modelo. El sensor hall debe tener unas características similares al siguiente:

Tabla 1. Sensor hall para medida de corriente

Sensor hall modelo HE200T3	
Corriente nominal	200 A rms
I _{out} (I _n)	100 mA
Ganancia	1:2000
Rango de medidas	±300 A
Precisión	0,7 %
Ancho de banda	0-100 kHz
Alimentación	±12 V a ±18 V

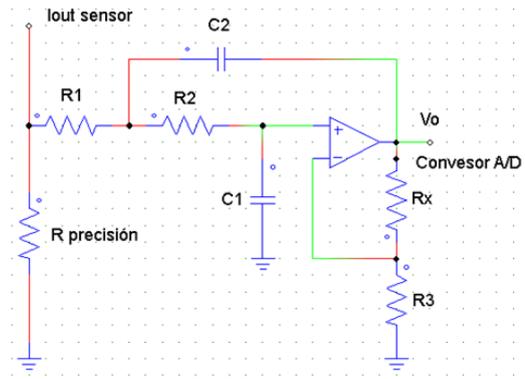


A continuación debemos desarrollar un circuito de acondicionamiento, que tome la corriente de salida del sensor efecto hall y la transforme a valores de tensión adquiribles por el convertor A/D. Ya que la corriente puede ser tanto positiva como negativa conectaremos estas medidas a la entrada del convertor en modo AC, lo que permite entradas de $\pm 1,5V$ a nuestro DSP. Esto es una opción más sencilla que conectarlas en modo DC (0-3V) lo que nos obligaría a incluir otros elementos para ajustar el offset (a +1,5 V).

Primero, el circuito necesita de un filtro paso bajo. La corriente a medir es aproximadamente constante pero puede contener señales de alta frecuencia que produzcan aliasing durante el muestreo. Con un filtro de segundo orden será suficiente.



Además, si incluimos un par de resistencias al filtro anterior podremos ajustar la ganancia y aprovechar al máximo el rango de entrada del convertor A/D, sin necesidad de más elementos. El resultado final del circuito acondicionador para la medida de corriente puede verse en la Figura 2.



$$R_1 = R_2 = 33 \text{ k}\Omega \quad C_1 = C_2 = 0,47 \text{ }\mu\text{F}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 10,26 \text{ Hz} \quad K = 1 + \frac{R_x}{R_3}$$

$$R_3 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_x \text{ (Ajustar la ganancia)}$$

No invierte la fase

Figura 2. Medida de corriente. Circuito de acondicionamiento y ecuaciones correspondientes

En el caso del motor, la corriente máxima va a ser de 197 A (a la potencia máxima de 75 kW). Con la ganancia de 1:2000 calculamos el valor máximo de la corriente de salida del sensor efecto hall:

$$I_{OUT-m\acute{a}x} = I_{m\acute{a}x} \cdot G = \frac{197 \text{ A}}{2000} = 98,5 \text{ mA} \quad (1.1)$$

Calculamos el valor de $R_{precisi\acute{o}n}$ para aprovechar el máximo el rango de entrada de $\pm 1,5V$ del convertor A/D:

$$R_{precisi\acute{o}n \text{ te\acute{o}rica}} = \frac{V_{in}}{I} = \frac{1,5 \text{ V}}{98,5 \text{ mA}} = 15,22 \text{ }\Omega \quad (1.2)$$

Como esa resistencia no se encuentra en el mercado tendremos que buscar otra (de valor menor) entre los valores comerciales.

$$R_{precisi\acute{o}n-motor} = 12 \pm 1\% \text{ }\Omega \quad (1.3)$$

Posteriormente fijando el valor de R_x puede ajustarse la ganancia al punto que sea necesario, para alcanzar exactamente los $\pm 1,5 \text{ V}$. Mostraremos el proceso de cálculo en esta primera ocasión:

$$V_{m\acute{a}x R_{precisi\acute{o}n}} = \frac{197 \text{ A}}{2000} \cdot 12 \text{ }\Omega = 1,182 \text{ V} \quad (1.4)$$



$$K = \frac{1,5V}{1,182 V} = 1 + \frac{R_x}{R_3} \quad (1.5)$$

$$R_{x-motor} = \left(\frac{1,5V}{1,182 V} - 1 \right) R_3 = 2690 \Omega \approx 2,6 k\Omega \quad (1.6)$$

Con estos valores, la función de transferencia del filtro será la representada en la Figura 3.

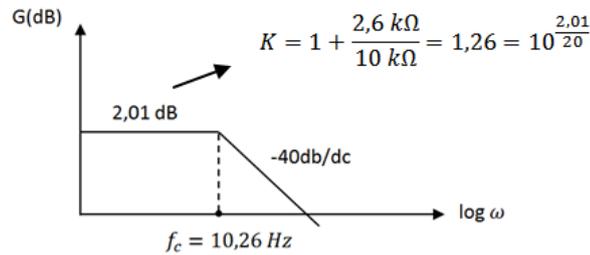


Figura 3. Función de transferencia aproximada del filtro

De forma semejante, la corriente por las baterías idealmente no superará los 60 A, pero pueden darse situaciones excepcionales (cuando el supercondensador se agote) que alcancen los 197 A del motor. Por lo tanto usaremos los mismos valores.

$$R_{\text{precisión-batería}} = 12 \pm 1\% \Omega \Rightarrow R_{x-batería} = 2,6 k\Omega \quad (1.7)$$

Por último, las células del supercondensador son capaces de soportar corrientes de 210 A de forma estacionaria. Dimensionaremos su circuito de acondicionamiento para que puedan medirse hasta 300 A puntuales (el rango máximo del sensor hall, ver Tabla 1).

$$I_{OUT-máx} = I_{máx} \cdot G = \frac{300 A}{2000} = 150 mA \quad (1.8)$$

$$R_{\text{precisión teórica}} = \frac{V_{in}}{I} = \frac{1,5 V}{150 mA} = 10 \Omega \quad (1.9)$$

En este caso el valor coincide con una resistencia comercial.

$$R_{\text{precisión-supercondensador}} = 10 \pm 1\% \Omega \Rightarrow \text{No es necesaria } R_3 \text{ y } R_x \quad (1.10)$$

La función de transferencia del filtro es semejante a la de la Figura 3 (solo varía la ganancia en la banda de paso).



2.1. Eficiencia del circuito de acondicionamiento

A continuación comprobaremos la eficiencia del circuito de acondicionamiento planteado. La mayor parte de la energía es disipada en $R_{precisión}$. Calculamos su valor para el caso más exigente:

$$P_{R_{precisión}} = I^2 R_{precisión} = \left(\frac{300 \text{ A}}{2000}\right)^2 \cdot 10\Omega = 0,225 \text{ W} \quad (2.1)$$

La potencia disipada en la Ecuación 2.1 es relativamente baja, comparándola con los 75kW que entrega el motor. Comparamos este valor con la potencia que se disiparía utilizando una resistencia shunt de valor pequeño ($R_{shunt} = 1 \text{ m}\Omega$):

$$P_{R_{shunt}} = I^2 R_{shunt} = 300^2 \cdot 1\text{m}\Omega = 90 \text{ W} \gg 0,225 \text{ W} \quad (2.2)$$

Como vemos en la ecuación 2.2, la potencia a disipar por una resistencia colocada en serie con los elementos de potencia es elevada, siendo un sistema menos eficiente.

3. MEDIDA DE LA TENSIÓN: SUPERCONDENSADOR Y BATERÍAS

Para el correcto funcionamiento del sistema también es necesario conocer los valores de tensión en la batería y supercondensador. El principal objetivo de la medida de tensión del supercondensador es conocer su estado de carga actual.

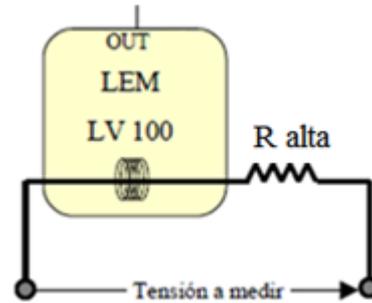
Para medir esta variable, una de las opciones más sencilla es emplear un divisor de tensión. Sin embargo, lo que haremos será conectar a la batería y al supercondensador una resistencia conocida de gran valor en serie con otro sensor de efecto hall. De esta forma hacemos que circule por esa resistencia una corriente de pequeño valor que medimos nuevamente con un sensor hall, consiguiendo nuevamente el aislamiento.

En este caso, no podemos emplear el mismo sensor hall que en el apartado anterior, ya que la corriente que generamos para medir es mucho menor (si fuese grande estaríamos perdiendo mucha energía de las baterías y supercondensadores en la medición). El sensor hall a utilizar debe tener unas características similares al siguiente:



Tabla 2. Sensor hall LV100

Sensor hall modelo LV 100	
Corriente nominal	10 mA
Ganancia	5:1
Rango	± 20 mA
I _{out} nominal	50 mA
di/dt	50 A/ μ s
Aislamiento	6 kV/50Hz/1min
Alimentación	± 15 V
Otros	Cumple RoHS



Para evitar el consumo de energía de baterías y supercondensadores la resistencia es alta y la corriente a medir pequeña. Por ello, al contrario que en el apartado anterior (donde la ganancia era 1:2000), en este caso los bobinados guardan una relación mayor a la unidad (5:1), amplificando la señal del circuito primario.

El valor máximo de tensión que mide el sensor será la suma de la tensión en las baterías más la caída de tensión en su resistencia interna cuando las baterías absorben la corriente máxima posible (cuando el supercondensador está cargado al máximo y no puede absorber más energía, lo cual es una situación extrema).

$$V_{\text{máx-baterías}} + V_{\text{máx-R}_{\text{int}}} = 400 + 0,24\Omega \cdot 197 \text{ A} = 447 \text{ V} \quad (3.1)$$

El rango de corriente del sensor es de hasta 20 mA (ver Tabla 2). El máximo valor de tensión que nos vamos a encontrar se calcula en 3.1.

$$R_{\text{alta (mín.)}} = \frac{V}{I} = \frac{447 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 22,35 \text{ k}\Omega \quad (3.2)$$

Sin embargo, para reducir la corriente y la potencia que se disipa en R_{alta} aumentaremos considerablemente su valor. Finalmente escogemos el siguiente valor tanto para la medida de las baterías como para el supercondensador, ya que son valores de tensión de orden similar.

$$R_{\text{alta-final}} = 330\text{k}\Omega \pm 1\% \quad (3.2)$$

Para realizar el acondicionamiento podemos utilizar el mismo circuito anterior: filtro paso bajo con resistencias para ajustar ganancia. Aunque la tensión de la batería varía



de forma lenta y podríamos prescindir del filtro, la corriente por la batería y caída de la tensión en su resistencia interna si van a ser variables y podrían producir aliasing.

En este caso los valores de corrientes presentes en el circuito son más bajos, por lo que utilizamos también un separador de impedancias ($V_o = V_i$), como se puede ver en la Figura 4.

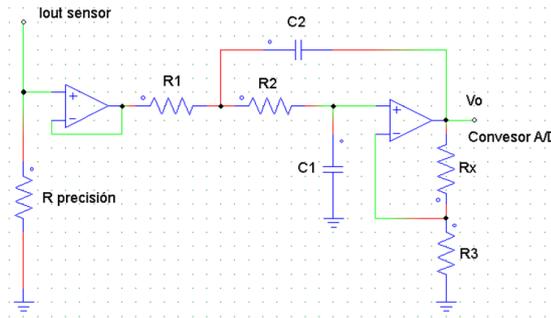


Figura 4. Medida de tensión. Circuito de acondicionamiento

En este caso sí podemos conectar la entrada del convertor en modo DC (0-3V), ya que no existirán valores de tensión negativos. Con $R_{alta-final}$ la corriente de salida del sensor hall tendrá el siguiente valor máximo para la medida en la batería:

$$I_{out-m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{R_{alta}} \cdot G = \frac{447V}{330k\Omega} \cdot 5 = 6,77 \text{ mA} \quad (3.3)$$

Calculamos la resistencia necesaria en el circuito de acondicionamiento para adaptar la señal a los 3 V de entrada del convertor A/D.

$$R_{precisi\acute{o}n \text{ te\acute{o}rica}} = \frac{V_{in}}{I_{out-m\acute{a}x}} = \frac{3 \text{ V}}{6,77 \text{ mA}} = 433\Omega \quad (3.4)$$

De forma similar al apartado anterior, buscamos un valor comercial y ajustamos la ganancia con R_x para alcanzar los 3 V exactos.

$$R_{precisi\acute{o}n-supercondensador} = R_{precisi\acute{o}n-bater\acute{a}} = 390 \pm 1\% \Omega \quad (3.5)$$

$$R_{x-bater\acute{a}} = 1,35 \text{ k}\Omega \quad (3.6)$$

El valor máximo de tensión a medir en el supercondensador se producirá cuando se encuentre a punto de cargarse por completo (307,8 V) y exista un frenado regenerativo de valor alto (-210 A), por lo que se debe sumar también la caída de tensión en ESR.



$$V_{\text{máx-baterías}} + V_{\text{máx-ESR}} = 307,8 + 0,0445\Omega \cdot 210 \text{ A} = 317 \text{ V} \quad (3.7)$$

$$V_{\text{máx}R_{\text{precisión}}} = \frac{317 \text{ V}}{330\text{k}\Omega} \cdot 5 \cdot 390 \Omega = 1,87 \text{ V} \quad (3.8)$$

$$R_{\text{x-supercondensador}} = \left(\frac{3\text{V}}{1,87 \text{ V}} - 1 \right) R_3 = 6042 \Omega \approx 6 \text{ k}\Omega \quad (3.9)$$

4. MEDIDA DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR

Para medir la velocidad del motor también tenemos varias opciones. Una de ellas es emplear un encoder incremental, donde la velocidad es proporcional a la frecuencia de la señal de salida. Para emplearlo tendríamos que contar el número de pulsos que se producen en un intervalo de tiempo, por lo que el valor de la velocidad no estaría siempre disponible y actualizado, al menos no al mismo ritmo que el resto de parámetros medidos.

Otra posibilidad es utilizar una dinamo tacométrica, donde la velocidad es proporcional a la tensión. Finalmente nos decantamos por esta solución:

Tabla 3. Dinamo tacométrica para medida de la velocidad

Modelo Radio Energy 1 R 20	
Velocidad máxima	8000 rpm
Tensión máxima	160 V
In máx.	0,55 A
Tensión a 1000 rpm	20 V
Otros	Funcionamiento Reversible

Ha sido difícil hallar datos específicos sobre los motores reales que se utilizan en los vehículos eléctricos. Si se ha podido saber que para la transmisión no utilizan caja de cambios como los vehículos convencionales, sino que utilizan sistemas para variar la frecuencia (y con ello la velocidad) a la que trabaja el motor eléctrico.

Actualmente algunos están estudiando la posibilidad de utilizar 2 ó 3 marchas automáticas, lo cual permitiría al motor funcionar siempre en su rango de mayor rendimiento, lo que podría aumentar la autonomía del vehículo un 10-15 %. Por el momento, los fabricantes de vehículos eléctricos prefieren evitar utilizar las cajas de cambios, ya que suponen un mayor coste de fabricación y diseño.



En nuestro caso, la velocidad nominal de nuestro motor era de 3000 rpm. Vamos a calcular la velocidad del vehículo con el motor funcionando a su velocidad nominal. Esto dependerá del tamaño de las ruedas del automóvil, pondremos por ejemplo unas ruedas de 0,5 metros de diámetro (semejantes a las de un coche real).

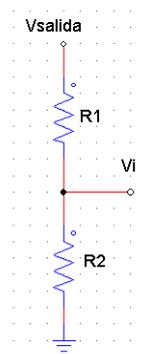
$$L_{\text{ruedas}} = 2\pi R = 2\pi \cdot \frac{0,5\text{m}}{2} = 1,57\text{m} \quad (4.1)$$

$$\text{Velocidad} = v_{\text{motor}} \cdot L_{\text{ruedas}} = \frac{3000}{60} \text{ rps} \cdot 1,57\text{m} = 78,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 280 \text{ km/h} \quad (4.2)$$

Para una rueda de un tamaño inferior (ej.: 0,4 m) el resultado sigue estando por encima de 200 km/h. De esto podemos deducir que el variador de frecuencia del motor hará trabajar el motor por debajo de la velocidad nominal (aumentando asimismo el par).

Para ajustar la medida de la velocidad a la entrada de 3 V del conversor A/D utilizaremos un divisor de tensión. La tensión máxima a repartir en el divisor la hemos fijado en 60V, que es la correspondiente a la que proporciona la dinamo a los 3000 rpm nominales del motor. Como se ha calculado en las Ecuaciones 4.1 y 4.2, el motor no necesitará superar la velocidad nominal de 3000 rpm para que el vehículo alcance una velocidad alta.

Para ajustar la medida de velocidad al conversor (3 V), las resistencias de la Figura 5 deberán guardar por tanto una relación inferior a $3/60=0,05$. Con esos parámetros acudimos a valores de resistencias comerciales.



$$R_1 = 47 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 2,2 \text{ k}\Omega$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 0,0468 < 0,05$$

$$V_{o-\text{máx}} = 60 \text{ V} \quad V_{i-\text{máx}} = V_{o-\text{máx}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 2,68 \text{ V}$$

Figura 5. Divisor de la tensión de salida de la dinamo

Como en este caso no estamos usando un sensor de efecto hall como en los circuitos anteriores, necesitaremos de un amplificador de aislamiento. También usaremos



nuevamente un filtro paso bajo incluyendo las resistencias para ajustar la ganancia. El circuito de acondicionamiento final se puede ver en la Figura 6.

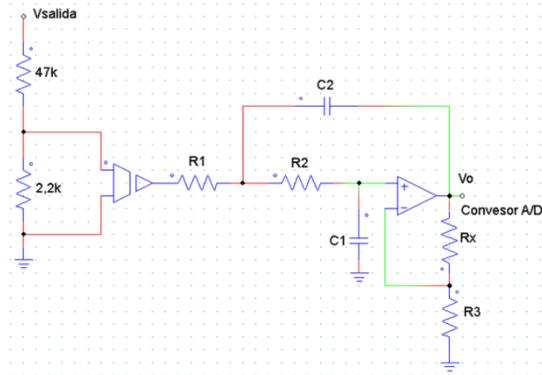


Figura 6. Medida de la velocidad. Circuito de acondicionamiento

El amplificador de aislamiento requerirá una fuente de alimentación aislada y estar conectado a dos masas diferentes. Calculamos el valor de R_x para aprovechar al máximo el rango de entrada del conversor A/D (3V).

$$K = \frac{3V}{2,68V} = 1 + \frac{R_x}{R_3} \Rightarrow R_x = 1,2 \text{ k}\Omega \quad (4.3)$$

Si en todos los casos anteriores no se encuentra el valor concreto de R_x este puede conseguirse mediante una resistencia de valor variable o empleando 2 resistencias en serie. Se ha tratado de que todos los circuitos de acondicionamiento sean semejantes, para facilitar tanto el diseño como posteriores operaciones de fabricación, montaje y mantenimiento.

5. MEDIDA DE LA TEMPERATURA EN LA BATERÍA

Como ya se ha explicado en el anexo N°2, *Problemática en las baterías de ión-litio*, las baterías de litio son especialmente sensibles a la temperatura. Por lo tanto, resulta conveniente controlar esta variable para poder prevenir su sobrecalentamiento.

Para medir este valor tenemos diferentes posibilidades. Como el rango de temperaturas que se van a medir se encuentra a priori en torno a temperaturas ambientales, un termopar no será necesario, ya que sirven para medir rangos de temperatura mayores y tienen menor sensibilidad.



Una buena opción podría ser un termistor NTC, pero su alinealidad aunque puede ser corregida por software podría complicarnos obtener el valor de la temperatura. Finalmente elegimos una RTD como sensor de temperatura, ya que también presentan una buena sensibilidad, precisión y estabilidad.

La RTD elegida tiene un valor de $R_0 = 100\Omega$ a 0°C , un coeficiente de temperatura de valor $\alpha = 0,00385^\circ\text{C}^{-1}$ y un rango de operación de -50°C a 150°C , que es más que suficiente para medir la temperatura de la batería. Para una mayor precisión se realizará la medida a 4 hilos. Como fuente de intensidad utilizaremos el circuito de la Figura 7.

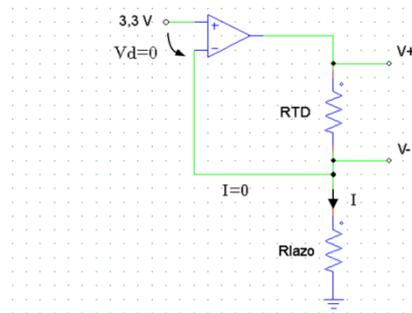


Figura 7. Fuente de intensidad mediante lazo de corriente

El valor de 3,3 V proviene de la fuente de alimentación auxiliar diseñada en el anexo N°14 y es uno de los valores de tensión que alimentan el DSP. La corriente idónea para la medida en la RTD debe ser de 1mA (es un valor típico y viene especificado por el fabricante). Si la corriente fuese mayor podría necesitarse un transistor a la salida del AO, pero no es el caso. Calculamos el valor de la resistencia:

$$I = 1 \text{ mA} = \frac{3,3\text{V}}{R_{\text{lazo}}} \Rightarrow R_{\text{lazo}} = 3,3\text{k}\Omega \quad (5.1)$$

Tomamos la medida diferencial amplificándola con una ganancia que no rebase el rango del convertidor A/D. Como la temperatura variará lentamente no hemos visto necesario incluir un filtro.

El circuito de acondicionamiento final queda representado en la Figura 8:

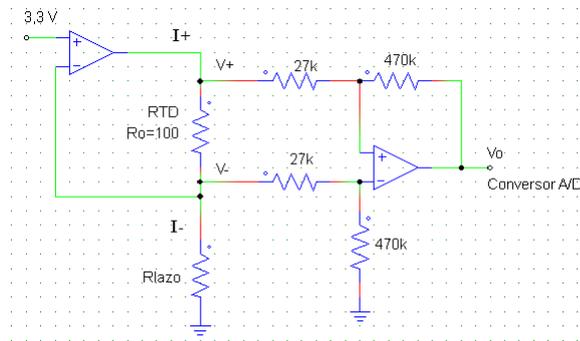


Figura 8. Medida a 4 hilos de la temperatura. Circuito de acondicionamiento

Calculamos el valor de salida V_o del circuito:

$$R_T = R_o(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (5.2)$$

$$V_d = V_+ - V_- = I \cdot R_T \quad (5.3)$$

$$V_o = V_d \cdot G = V_d \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (R_1 = 27k\Omega \quad R_2 = 470k\Omega) \quad (5.4)$$

Sustituyendo la ecuación 5.2 en 5.3 y esta última en 5.4 obtenemos:

$$V_o = 100\Omega(1 + 0,00385^\circ\text{C}^{-1}\Delta T)10^{-3}\text{A} \frac{470k\Omega}{27k\Omega} = 1,74\text{V} + 6,7 \cdot 10^{-3}\Delta T \frac{\text{V}}{\text{K}} \quad (5.5)$$

Derivando la ecuación 5.5 puede obtenerse la sensibilidad:

$$S = \frac{dV_o}{dT} = 6,7 \text{ mV/K} \quad (5.6)$$

Sustituyendo en la ecuación 5.5 por las temperaturas límites del rango de trabajo del sensor (-50°C y 150°C):

$$V_{o(-50^\circ\text{C})} = 1,74 \text{ V} + 6,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{K}} \cdot (-50^\circ\text{C}) = 1,405 \text{ V} \quad (5.7)$$

$$V_{o(150^\circ\text{C})} = 1,74 \text{ V} + 6,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{K}} \cdot 150^\circ\text{C} = 2,745 \text{ V} \quad (5.8)$$

Aproximadamente se ajusta al rango del conversor A/D.



Podría modificarse el circuito y ajustar el offset con el valor que se obtiene de la ecuación 5.7, para que a la mínima temperatura del rango de la RTD (-50°C) el valor de salida fuese $V_o = 0$. Aumentando después la ganancia, se podría ajustar así la medida a todo el rango de entrada del conversor A/D y aumentar la sensibilidad, pero no se ha considerado necesario.

Tal como se ve en la Figura 25 del anexo N°10, *Desarrollo del algoritmo de control*, el valor de tensión V_o que entra al DSP se convertirá a grados centígrados para activar la salida correspondiente cuando la temperatura supera los 70°C , indicando al usuario un sobrecalentamiento de las baterías.

6. LOCALIZACIÓN DE LOS SENSORES

Para una mejor comprensión se ha desarrollado un esquema que muestra la ubicación de los diferentes sensores. El sensor LT100S se usa para medir la corriente, el LV100 se usa para medir la tensión y la dinamo para medir la velocidad. El sensor de temperatura deberá localizarse en la batería, tal como se puede ver en la Figura 9.

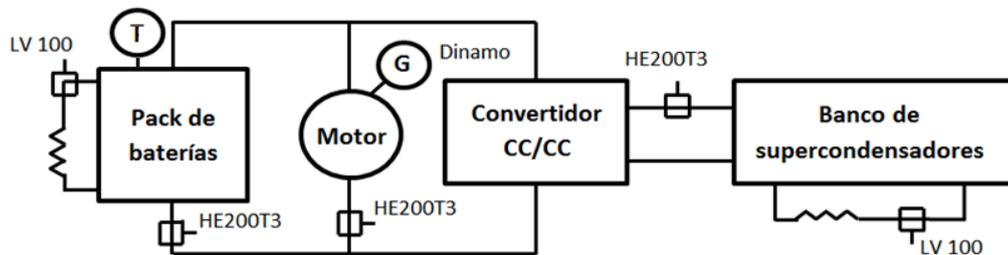


Figura 9. Localización de los sensores en el circuito de potencia

Las sensibilidades que proporcionan cada uno de los circuitos anteriores pueden verse en la Tabla 4.

Tabla 4. Sensibilidad final de los sensores junto al circuito de acondicionamiento

Medición	Sensibilidad	Valor máximo medible
I batería	7,56 mV/A	± 197 A
I motor	7,56 mV/A	± 197 A
I supercondensador	5 mV/A	± 300 A
V batería	6,7 mV/V	447 V
V supercondensador	9,45 mV/V	317 V
Velocidad	1 mV/rpm	3000 rpm
Temperatura	6,7 mV/K	-50°C a $+150^{\circ}\text{C}$



7. CIRCUITO DE CONTROL (DSP)

En el anexo N°12, *DSP y Código del programa de control*, se elige el DSP TI F28335, que incluye multiplexor y convertor A/D cuyo rango de entrada es el ya descrito ($\pm 1,5 V$ ó $3V$, dependiendo de si configuramos la entrada como AC o DC).

El pin VDDIO que alimenta las entradas y salidas digitales debe ser alimentado con 3.3 V. El pin VDD alimenta los circuitos lógicos y la CPU y debe ser alimentada a 1.9 V. Los pines VSS deben ser conectados a masa.

En cuanto al convertor A/D conectamos los canales ADCINA0/6 a nuestras variables analógicas. Los canales no usados deben conectarse a masa (VSSA1GND, VSSA2GND). El pin ADCLO también debe conectarse a masa. Los pines VDDAIO y VDDA2 deben estar alimentados a 3.3 V, mientras que los pines VDD1A18 y VDD2A18 deben estar alimentados a 1.9 V. El pin de referencia ADCREFIN lo alimentaremos a 1.5 V. ADCRESEXT debe conectarse a masa a través de una resistencia para dar camino a las corrientes de polarización. ADCREFP y ADCREFM se conectan a un condensador y VSSAIO se conecta a masa. La configuración de pines del convertor puede verse resumida en la Figura 10.

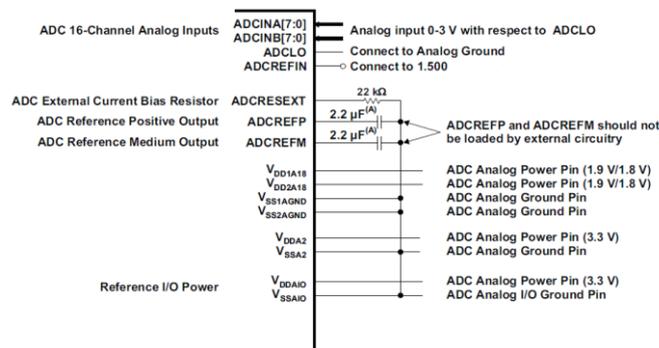


Figura 10. Configuración del convertor A/D

El reloj de 150 MHz del DSP se obtiene a partir de un oscilador interno, conectando un cristal de cuarzo entre las salidas X1 y X2 del DSP. En este caso el pin XCLKIN deberá estar conectado a tierra, como se puede ver en la Figura 11.

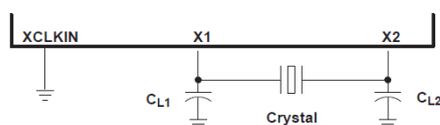


Figura 11. Conexión del cristal de cuarzo para generar el reloj del DSP



El reset del DSP es activo a nivel bajo, por lo que se ha usado un condensador que una vez cargado mantiene el nivel alto. El reset debe conectarse en el pin \overline{XRS} . Todas estas conexiones quedan detalladas en los planos.

8. ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE SALIDA

8.1. Diodos LED

Para poder diseñar posteriormente la fuente de alimentación (anexo N°14) debemos conocer el consumo de los LED (aunque no sea alto sí es de orden comparable al del consumo del DSP y otros elementos del control). El Reset del DPS y los circuitos de los LED irán alimentados a 3.3V, aprovechando una tensión que es necesaria para algunos pines de alimentación del DSP (ej: pin denominado VDDIO).

El circuito para el encendido del diodo LED puede verse en la Figura 12.

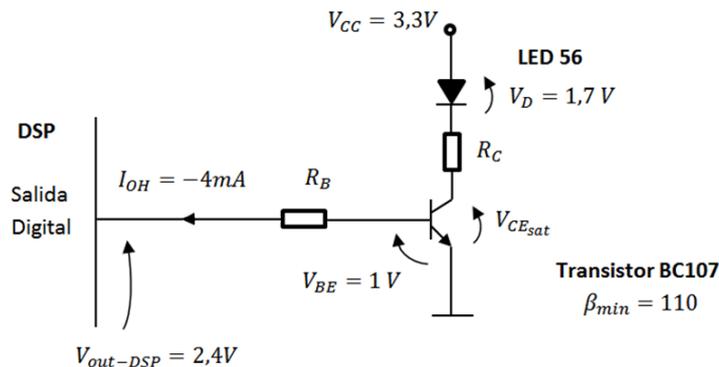


Figura 12. Circuitos para el encendido/apagado de los LED indicadores

El LED admite hasta 100 mA. Para alargar su vida útil haremos circular una corriente $I_C = I_{LED} = 20$ mA. Para calcular el valor de las resistencias aplicaremos el convenio de saturación fuerte (V_{CEsat} fuerte = 0V).

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{LED} - V_{CEsat}}{I_C} = \frac{3,3 \text{ V} - 1,7 \text{ V} - 0}{20 \text{ mA}} = 80 \Omega \quad (6.1)$$

Utilizando la ganancia mínima calculamos la corriente por la base.

$$I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta_{min}} = \frac{20 \text{ mA}}{110} = 0,18 \text{ mA} \quad (6.2)$$



Aplicamos el convenio de saturación fuerte:

$$I_{\text{Bsat fuerte}} = I_{\text{Bsat}} \cdot 10 = 1,8 \text{ mA} \quad (6.3)$$

Comprobamos que el resultado de 6.3 cumple la condición de la ecuación 6.4:

$$I_{\text{Bsat fuerte}} = 1,8 \text{ mA} < |I_{\text{OH}}| \quad (6.4)$$

Finalmente, en la ecuación 6.5 calculamos la resistencia necesaria en la base:

$$R_B = \frac{V_{\text{out}} - V_{\text{BE}}}{I_B} = \frac{2,4 \text{ V} - 1 \text{ V}}{1,8 \text{ mA}} = 777 \Omega \quad (6.5)$$

8.2. Driver para el módulo IGBT

Las salidas del sistema de control son las señales PWM que controlan los IGBT. Con estas señales se hace trabajar al convertidor en modo elevador o reductor, controlando el valor y sentido de la corriente. De esta forma se establece el estado de carga adecuado para el supercondensador (según la velocidad y modo de funcionamiento) y se realizan las aceleraciones y frenados, evitando la degradación de las baterías. Para saber más sobre el funcionamiento ver el anexo N°10, *Desarrollo del algoritmo de control*, o el estudio matemático del convertidor en el anexo N°7, *Convertidores CC-CC para Sistema MES-AES*.

Para que los IGBT funcionen de forma adecuada, mantener sus señales de control correctamente referenciadas y conseguir el aislamiento entre el circuito de control y el de potencia existen diferentes posibilidades, visibles en la Figura 13.

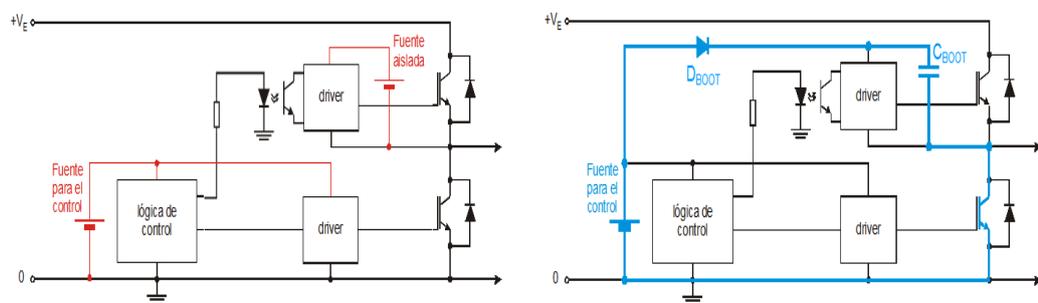


Figura 13. Control de los IGBTs mediante optoacoplador y fuente aislada (izquierda) y mediante la técnica bootstrap (derecha)



Nosotros lo que haremos será utilizar un circuito integrado específico proporcionado por el fabricante de los IGBT. El driver elegido es el SKHI 23/12 (R), que se representa en la Figura 14.

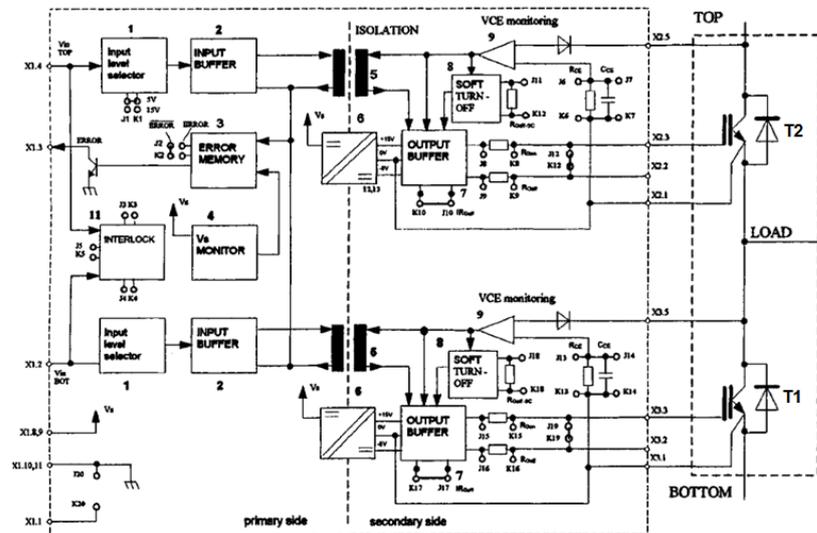


Figura 14. Driver específico para los IGBT seleccionados

De esta forma las señales están correctamente referenciadas. Además este circuito aísla el circuito de control del de potencia e incluye protección contra cortocircuitos, bloqueando los IGBT (el driver detecta el cortocircuito a través del testeado de la tensión V_{CE}). La conexión entre las señales de salida de nuestro DSP (T1 y T2), el driver y los IGBT debe realizarse de acuerdo al esquema de la Figura 15.

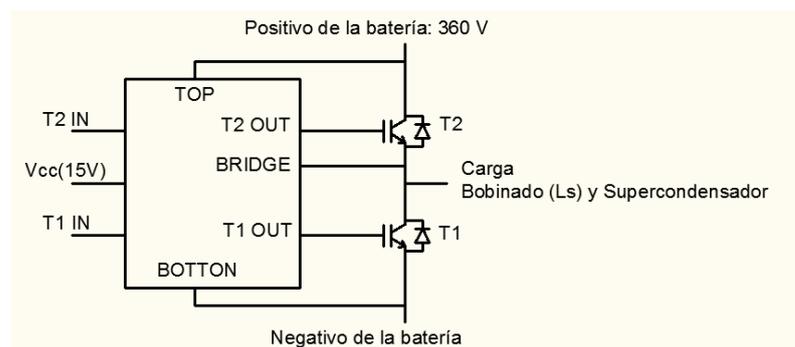


Figura 15. Esquema de conexión del driver para el circuito de potencia



9. CONCLUSIONES

Se han diseñado los circuitos de acondicionamiento de las señales de entrada y salida. Se han escogido los sensores hall, a pesar de su mayor coste, debido a que son un sistema mucho más eficiente que además proporciona el aislamiento requerido.

Según todo lo anterior el proceso completo queda de reflejado según la Figura 16.

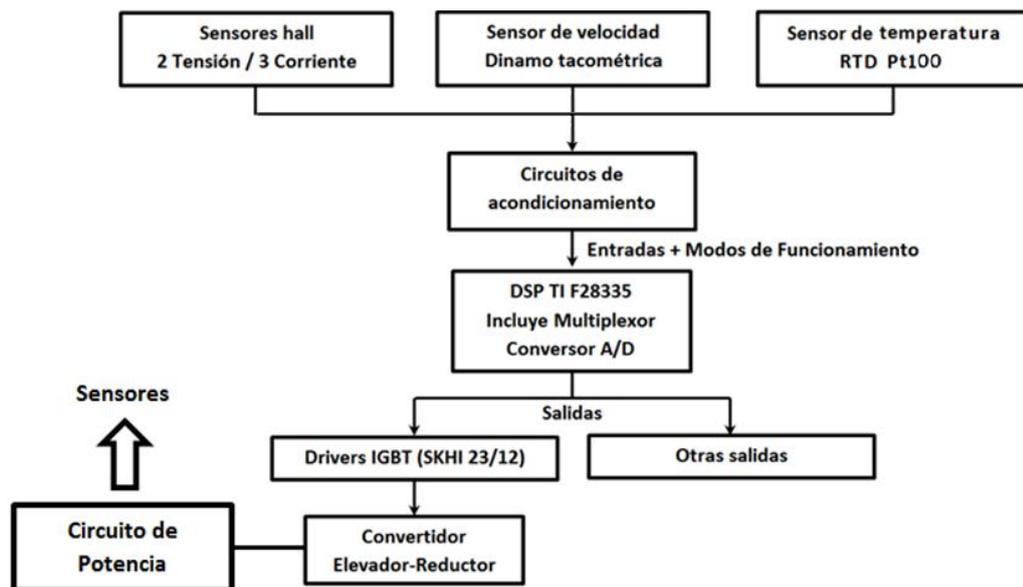


Figura 16. Configuración general de los elementos del circuito de acondicionamiento y control

En el siguiente anexo, *Fuente de alimentación auxiliar*, se diseña el circuito para la alimentación de los sensores hall, amplificadores operacionales, amplificador de aislamiento, drivers del módulo IGBT, alimentación del DSP y resto de elementos.

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ANEXO N°14

APLICACIÓN PRÁCTICA:

FUENTE DE ALIMENTACIÓN AUXILIAR

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. SOLUCIÓN ELEGIDA PARA LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	2
3. FUENTES DE ALIMENTACIÓN ± 15 V	3
4. FUENTES DE ALIMENTACIÓN DEL DSP	6
5. CONVERTIDOR CC/CA CON TRANSFORMADOR	9
5.1. Control del convertidor CC/CA.....	12
6. CONCLUSIONES.....	13



1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se diseñan las fuentes de alimentación auxiliares para alimentar los elementos del sistema de control, que se describen en el anexo N°13, *Circuitos de acondicionamiento y control*. Observando estos elementos, vamos a necesitar de 5 niveles de tensión, que agruparemos en 3 fuentes de tensión independiente:

- Fuente de alimentación $V = \pm 15V$. Para alimentar los amplificadores operacionales de propósito general, los sensores hall y los driver de los IGBT. Resultado de la suma de los consumos: $I = 629 mA$
- Otra fuente de alimentación $\pm 15V$. Para alimentar el primario del amplificador de aislamiento ($\pm V_{s1}$), ya que su masa debe ser diferente. Para la alimentación $\pm V_{s2}$ utilizaremos la fuente anterior. Consumo: $I = 5 mA$
- Fuente de alimentación del DSP. El DSP necesita los valores de tensión de 3.3V, 1.9V y 1.5 V para su funcionamiento. Los circuitos de los diodos LED y el reset aprovechan el valor de 3.3V para su funcionamiento. $I = 420 mA$

2. SOLUCIÓN ELEGIDA PARA LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Aunque existen diferentes posibilidades, como adquirir las fuentes de alimentación por separado o utilizar convertidores CC-CC reductores finalmente se ha decidido utilizar un transformador, ya que nos proporcionará aislamiento galvánico necesario entre las fuentes anteriormente mencionadas.

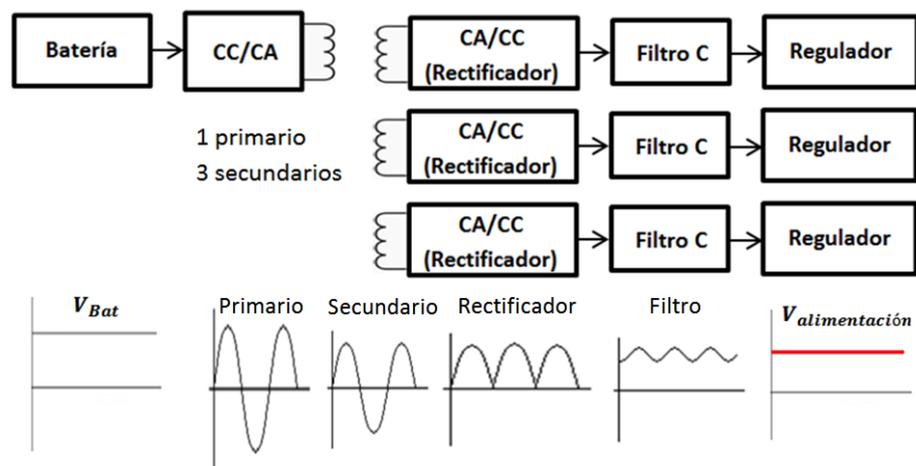


Figura 1. Fuente de Alimentación. Esquema explicativo



Como se ve en la Figura 1, el transformador se alimentará de la batería CC del vehículo, por lo que emplearemos un convertidor CC-CA que trabajará a alta frecuencia ($f=20\text{KHz}$) para reducir el peso del transformador. La tensión CA que reciben los tres secundarios del transformador será rectificadora posteriormente mediante un puente rectificador, un filtro por condensador y un regulador de tensión, obteniendo la tensión CC necesaria para cada caso.

3. FUENTES DE ALIMENTACIÓN $\pm 15\text{ V}$

Para realizar el diseño y calcular el consumo de los elementos se ha acudido a sus hojas de características (sensores hall, amplificadores LM324, amplificador de aislamiento ISO124P, driver SKHI 23/12 para el circuito de potencia y driver NCP5106 para el circuito de control). De esta forma hemos hallado la potencia consumida, la cual hemos sobredimensionado por coeficientes de entre 1,5 y 2.

Hallamos el valor mínimo de tensión que debe tener el secundario del transformador. Este valor dependerá de la tensión que tengamos que entregar a la carga, así como de la caída de tensión en los diodos y regulador de tensión elegidos.

$$V_{\text{secundario}} \geq V_L + V_D + V_{\text{Dropout}} \approx 15 + 1 + 2 = 18\text{ V} \quad (1)$$

Para asegurar el correcto funcionamiento y conseguir una tensión de $\pm 15\text{V}$ estable y de calidad aún cuando las baterías se encuentren en niveles de tensión bajos (cerca del final de su autonomía) se han considerado necesarios 25 V en el secundario del transformador.

Para poder obtener una alimentación simétrica (positiva y negativa) deberemos emplear un transformador con punto medio. Posteriormente emplearemos un puente rectificador y un filtro por condensador para obtener una tensión continua, que estableceremos en $\pm 15\text{V}$ con los reguladores de tensión. El circuito final, con las dos fuentes de $\pm 15\text{V}$ puede verse en la Figura 2.

El valor resistivo de las cargas representadas en la Figura 2 ($R_1 = R_2 = 15,8\ \Omega$ y $R_3 = R_4 = 1500\ \Omega$) es el que, con un valor de tensión de $\pm 15\text{V}$, absorbe la misma potencia calculada y sobredimensionada (entre 1,5-2 veces) que los elementos a alimentar.

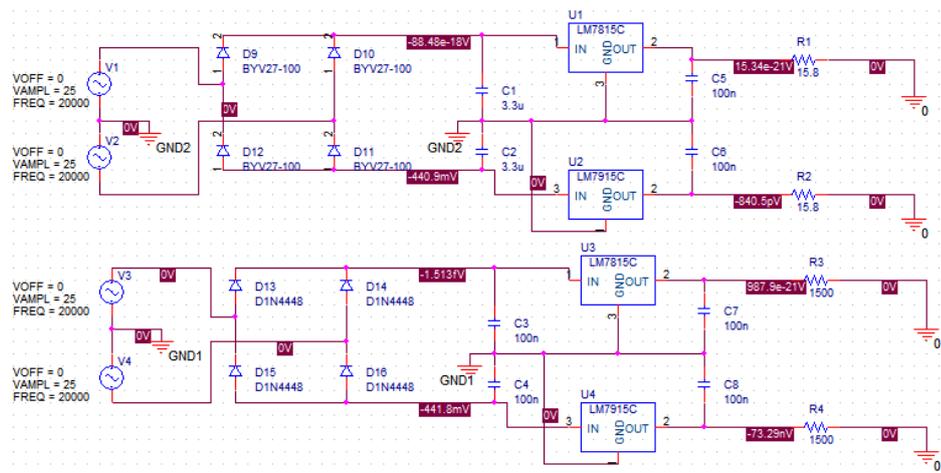


Figura 2. Circuito de la dos Fuentes de Alimentación de $\pm 15V$.

Simulamos el circuito anterior y comprobamos como obtenemos una tensión continua $\pm 15V$ sin apenas rizado.

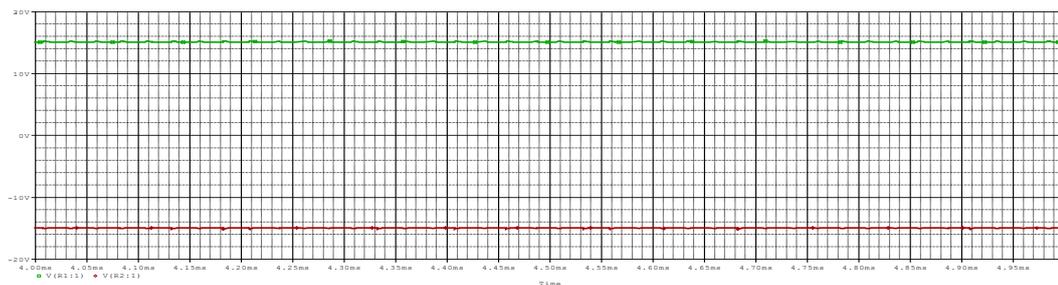


Figura 3. Tensión en R1 y R2 ($\pm 15 V$ respectivamente)

Tomamos los valores de corriente y tensión necesarios para seleccionar los elementos. Mostraremos los datos de los semiconductores del circuito superior (de D9 a D12 en la Figura 2), ya que son los más restrictivos.

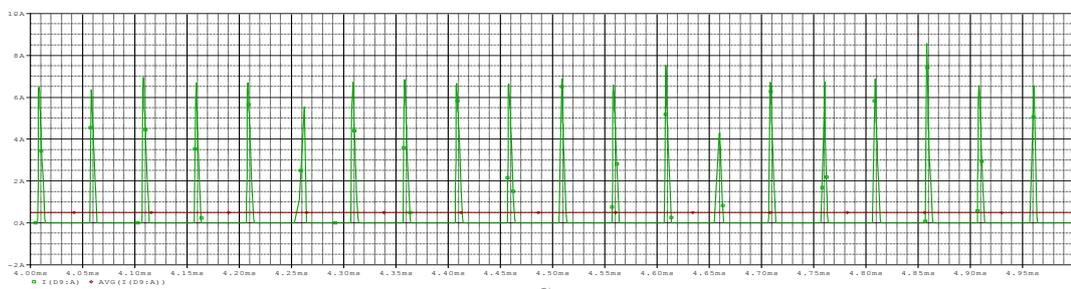


Figura 4. Corriente y corriente media por los diodos (en verde y rojo, respectivamente)

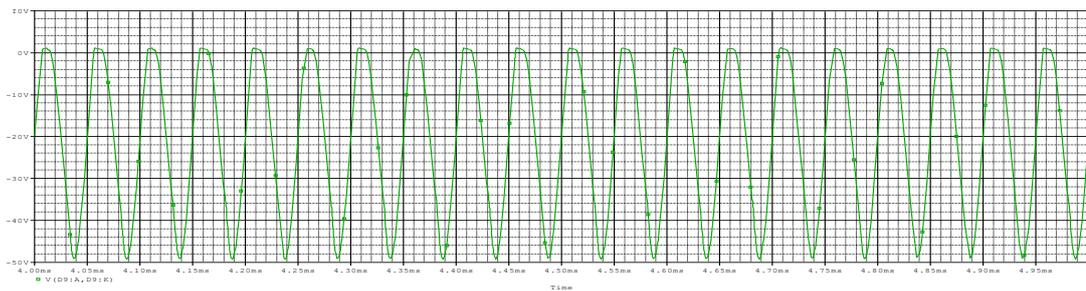


Figura 5. Tensión en los diodos (cuando conducen cae 1V aprox.)

Observamos también el valor de corriente por la carga (sobredimensionado respecto al valor dado en el apartado 1).

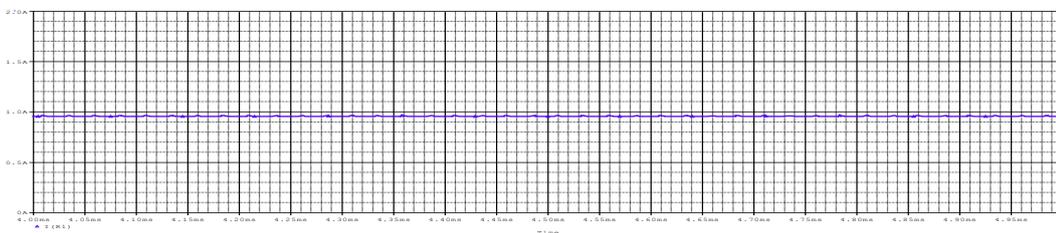


Figura 6. Corriente por la carga R1

Para seleccionar los semiconductores se han utilizado los valores de corriente media por el diodo y la tensión inversa que soportan. También nos hemos fijado especialmente en el parámetro IFRM (intensidad de picos repetitivos), ya que los condensadores para el filtrado de la señal producen picos repetitivos de valor considerable. El diodo seleccionado (BYV27-100) permite picos repetitivos de hasta 15 A, mientras que nuestro circuito produce picos inferiores a 10 A, por lo que es válido. El segundo parámetro (V_R) se ha sobredimensionado por 2, que suele ser lo habitual. Algunos de estos datos se agrupan en la Tabla 1.

Es importante recordar que la segunda fuente de $\pm 15V$ alimenta exclusivamente al amplificador de aislamiento (correspondiente a las cargas R3 y R4) y emplea una masa diferente (ver GND1 y GND2 en la Figura 2). Los requisitos de esta segunda fuente son menores, por lo que se ha seleccionado un diodo diferente siguiendo el mismo procedimiento.

Por último, también hemos comprobado que los reguladores de tensión seleccionados cumplen los requisitos exigidos por el circuito sobredimensionado:

Tabla 1. Selección de elementos. Fuentes de $\pm 15V$

	Intensidad	Tensiones		
Carga (RI)	954 mA	+/-15 V		
Reguladores	Iout	Vsalida		
LM7815	1 A	+15 V		
LM7915	1,5 A	-15 V		
Semiconductores	Imedia	Vinv máx	IFAV	VR
BYV27-100	491 mA	50 V	2 Amp	100 V
1N4448	7,3 mA	50 V	200 mA	100 V

Los condensadores deben tener los valores que se indican en la Figura 2. Sus valores han sido dimensionados para evitar que el rizado de la corriente sea grande (si se reduce su capacidad en un orden el rizado aumenta de forma considerable). También se ha calculado la potencia disipada. Los semiconductores no necesitan disipador para mantener su temperatura dentro de un valor aceptable.

4. FUENTES DE ALIMENTACIÓN DEL DSP

Los 3 niveles de tensión necesarios para alimentar el DSP (3.3V, 1.9V y 1.5 V) se obtienen a partir de un solo secundario del transformador. Podría incluirse un secundario para cada uno de ellos pero esto elevaría el peso, volumen y coste, además de ser bastante innecesario, ya que son valores de tensión próximos y que pueden usar la misma masa de referencia.

Para hallar el consumo se ha consultado la hoja de características del DSP. También se ha hallado el consumo de los diodos LED (es de orden similar) y el consumo del reset se ha considerado despreciable. El resultado final de este circuito se encuentra representado en la Figura 7.

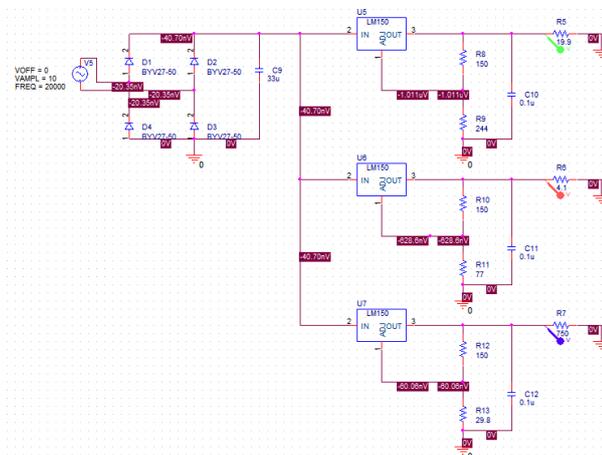


Figura 7. Fuente de Alimentación del DSP. De arriba abajo, valores de tensión de salida de 3.3V, 1.9 V y 1.5V



Para obtener el circuito de la Figura 7, siguiendo el mismo procedimiento que en la ecuación 1, en esta ocasión se han considerado necesarios 10 V en el secundario.

$$V_{\text{secundario}} \geq V_L + V_D + V_{\text{Dropout}} \approx 3,3 + 1 \cdot 2 + 2 = 7,3 \text{ V} \Rightarrow 10 \text{ V} \quad (2)$$

Como regulador de tensión empleamos el LM150 que proporciona una salida de $V_{\text{ref}} = 1,25 \text{ V}$. Calculamos las resistencias necesarias para que la tensión de salida V_{out} alcance los valores necesarios:

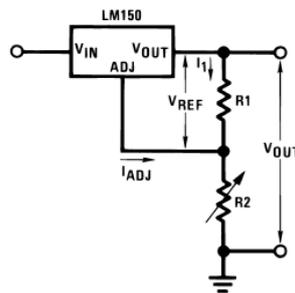


Figura 8. Esquema de un regulador de tensión variable

$$I_1 = \frac{V_{\text{Ref}}}{R_1} \quad I_1 \geq 5 I_{\text{ADJ}} \quad (3)$$

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}} + V_{\text{R2}} \quad R_2 = \frac{V_{\text{out}} - V_{\text{ref}}}{I_1 + I_{\text{ADJ}}} \quad (4)$$

Con $I_{\text{ADJ}} = 50 \mu\text{A}$ (extraída de la hoja de características), fijamos R_1 para que cumpla sobradamente la condición de la ecuación 3 y utilizamos la ecuación 4 para hallar el valor necesario de R_2 para alcanzar la tensión de salida V_{out} para cada caso, obteniendo el resultado visible en la Figura 7 anterior.

Simulamos el circuito y comprobamos las salidas de 3.3 V, 1.9 V y 1.5 V.

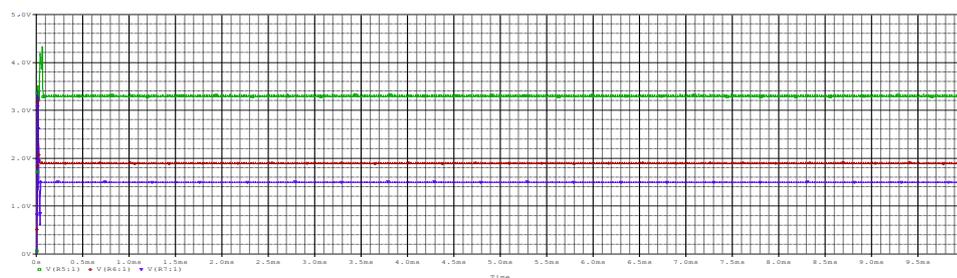


Figura 9. Valores de tensión: 3.3V, 1.9 V y 1.5V



En la Figura 9 vemos como existe un pequeño rizado, el cual podríamos reducir aumentando el valor del condensador, pero no es necesario ya que la tensión se mantiene dentro de la banda aceptada por el DSP.

Tomamos los valores de corriente y tensión necesarios para seleccionar los elementos.

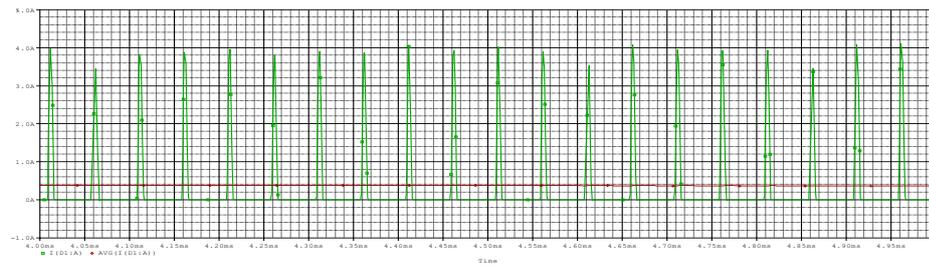


Figura 10. Corriente y corriente media por los diodos (en verde y rojo, respectivamente)

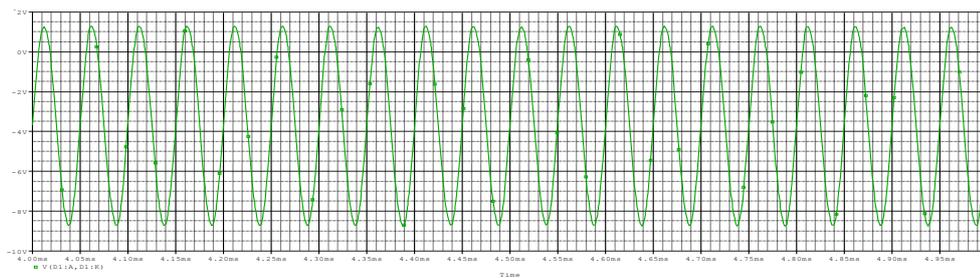


Figura 11. Tensión en los diodos (cuando conducen cae 1V aprox.)

También tomamos los valores de corriente por las cargas (aunque apenas difieren de los obtenidos a la hora de calcular los consumos sobredimensionados y las cargas R5, R6 y R7).

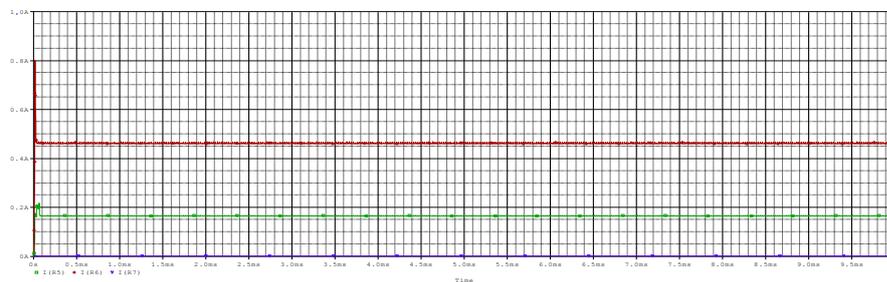


Figura 12. Valores de corriente por las cargas R5 (verde), R6 (rojo) y R7 (azul)

Comprobamos que el regulador elegido es válido y seleccionamos los semiconductores.



Tabla 2. Selección de elementos. Fuentes del DSP

	Intensidad	Tensiones
Carga R5	165 mA	3,3 V
Carga R6	460 mA	1,9 V
Carga R7	2 mA	1,5 V
Reguladores	Iout	Vsalida
LM7815	Hasta 3 A	1,25+VR2
Semiconductor	Imedia	Vinv máx
Simulación	369 mA	10 V
BYV27-50	IFAV	VR
	2 Amp	50 V

Se ha calculado la potencia disipada en los semiconductores y tampoco se requiere disipador.

5. CONVERTIDOR CC/CA CON TRANSFORMADOR

Para su diseño se ha supuesto que tendremos acceso a un total de 8 células de la batería con un punto medio, lo que nos proporciona una tensión nominal de 15+15V (4+4 células en serie).

Hemos elegido un convertidor CC-CA sencillo, para reducir el número de elementos y simplificar su control, que se realiza con una onda cuadrada. La intensidad en el bobinado del transformador no será una corriente senoidal perfecta (más bien triangular) pero será suficiente para la aplicación, ya que después la vamos a volver a rectificar a CC.

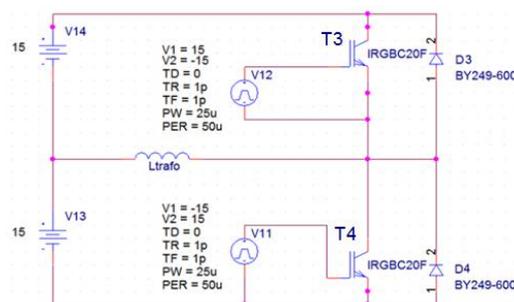


Figura 13. Transformador alimentado con la batería a través de un Convertidor CC/CA

La relación de transformación del primario con los otros 3 secundarios será la siguiente:

$$rt_1 = rt_2 = \frac{V_p}{V_s} = \frac{15V}{25V} = 0,6 \quad (5)$$



$$rt_3 = \frac{V_p}{V_s} = \frac{15V}{10V} = 1,5 \quad (6)$$

Tomamos los consumos de corriente calculados y hallamos las potencias en cada uno de los secundarios, que serán algo superiores a la potencia de la carga, debido a las pérdidas en los semiconductores y sobretodo a la caída de tensión en los reguladores. Los resultados son los siguientes:

$$P_{S1} = 33,4 \text{ W} \quad P_{S2} = 0,35 \text{ W} \quad P_{S3} = 4,5 \text{ W} \quad (7)$$

También puede hallarse la resistencia correspondiente a cada una de estas potencias, usando la tensión eficaz de cada secundario:

$$R_{S1} = \frac{V_{ef}^2}{P_{S1}} = \frac{(25/\sqrt{2})^2}{18,55} = 9,35\Omega \quad R_{S2} = 884\Omega \quad R_{S3} = 11,1\Omega \quad (8)$$

Aplicando la relación de transformación podemos hallar la resistencia equivalente en el primario:

$$R_{P1} = rt_1^2 R_{S1} = 3,36\Omega \quad R_{P2} = 318\Omega \quad R_{P3} = 25,1\Omega \quad (9)$$

$$R_{P_{equivalente}} = R_{P1} // R_{P2} // R_{P3} = 2,9\Omega \quad (10)$$

Este cálculo también puede hacerse considerando que no existen pérdidas en el transformador (normalmente tienen rendimientos cercanos al 100 %). Por lo tanto la potencia en el primario será igual a la suma de la potencia en los secundarios:

$$P_{Primario} = P_{S1} + P_{S2} + P_{S3} = 38,25 \text{ W} \quad (11)$$

$$R_{P_{equivalente}} = \frac{(15/\sqrt{2})^2}{38,25 \text{ W}} = 2,9\Omega \quad (12)$$

El resultado de las Ecuaciones 10 y 12 es el mismo. Utilizamos esa resistencia para simular la corriente por los semiconductores. La simulación del circuito del transformador puede verse en las Figuras 14 a 17.

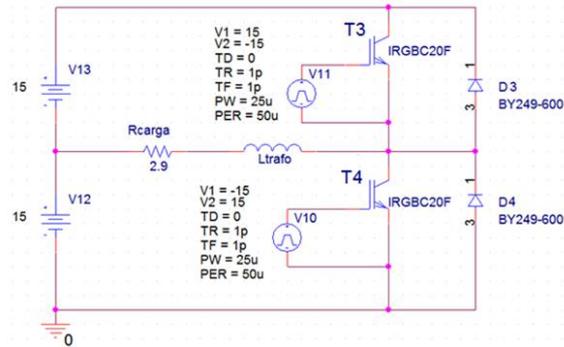


Figura 14. Circuito para simular la corriente sobre los semiconductores

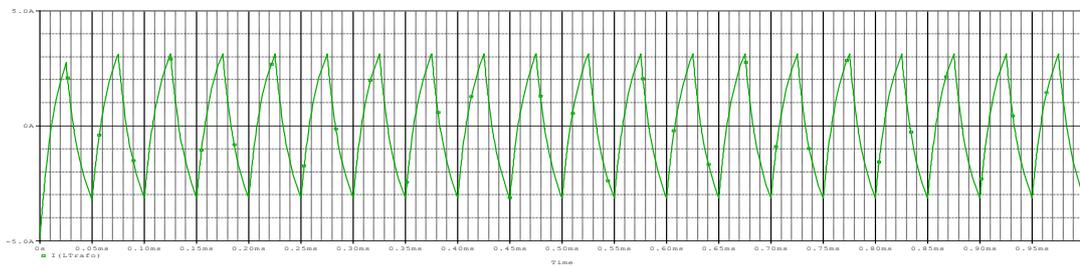


Figura 15. Corriente por la carga calculada ($R_{p_{equivalente}}$)

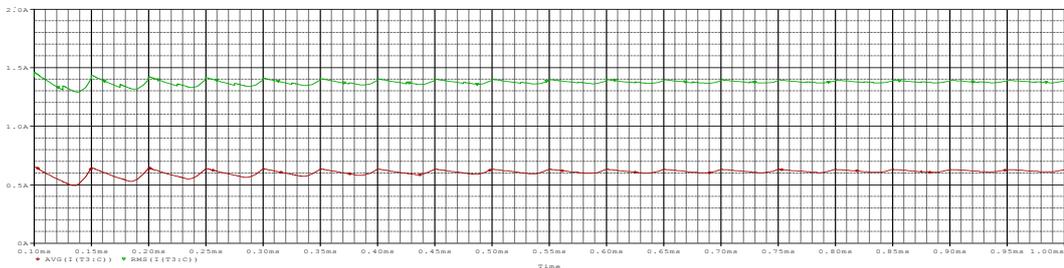


Figura 16. Corriente media (rojo) y eficaz (verde) por los semiconductores

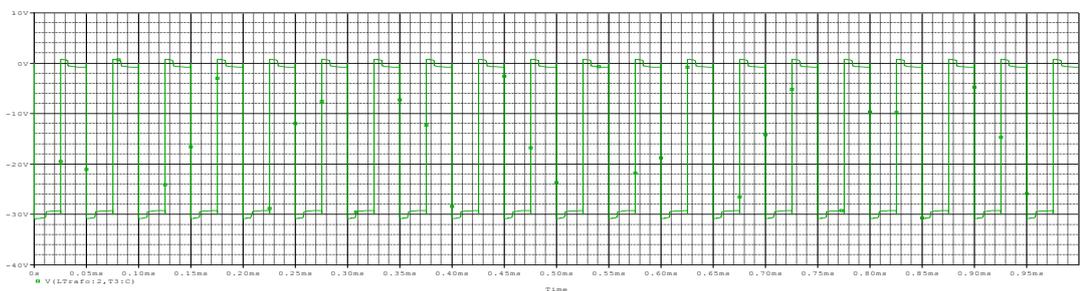


Figura 17. Tensión en los semiconductores (aprox. 1 V cuando conducen)

Debido a que estos semiconductores se encuentran conectados directamente al sistema de potencia (están conectados directamente a las baterías) se ha sobredimensionado considerablemente la tensión inversa que pueden soportar. Los parámetros de selección de los semiconductores pueden verse en la Tabla 3.



Tabla 3. Selección de semiconductores en el primario

	I _{media}	V _{inv} máx.
Simulación	0,63 A	30 V
Semiconductor	IFAV	VR
BY249-300	7 A	600
ITGB20F	9 A*	600

*Funcionando a 20 KHz la corriente IFAV se reduce (4 A)

Se ha calculado que tampoco será necesario un disipador. Sin embargo, para asegurar una baja temperatura de funcionamiento y alargar la vida de los componentes puede utilizarse un pequeño disipador con una resistencia térmica de 20-30 K/W.

Según la Ecuación 11, la potencia final del transformador es de 38,25 W. Aunque desconocemos el factor de potencia, un transformador de 50 VA debería ser suficiente, ya que desde el principio hemos sobredimensionado las cargas. Además el transformador deberá estar preparado para trabajar a 20 KHz. Las características del transformador se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Características del transformador

	Tensión eficaz	P sobredimensionada
Primario	$15/\sqrt{2}$	38,25 W
Secundario 1	$25/\sqrt{2}$	33,4 W
Secundario 2	$25/\sqrt{2}$	0,35 W
Secundario 3	$10/\sqrt{2}$	4,5 W
Frecuencia de trabajo		20.000 Hz

5.1. Control del convertidor CC/CA

Para controlar los IGBT de la anterior Figura 14 y generar una corriente alterna en el transformador a partir de la tensión CC de la batería utilizaremos una señal de onda cuadrada similar a la que puede verse en la Figura 18:

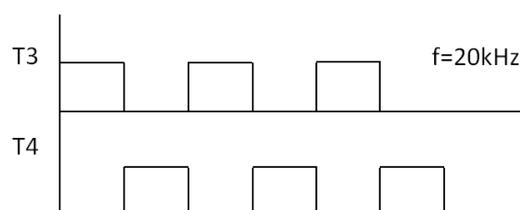


Figura 18. Control por onda cuadrada. Señales de control para T3 y T4



Las señales T3 y T4 se generan mediante el DSP, para saber más detalles consultar el anexo N°12, *DSP y código del programa de control*.

Para mantener las señales de control correctamente referenciadas y que T3 y T4 funcionen de forma adecuada, utilizaremos el driver NCP5106, cuya conexión se detalla en la Figura 19.

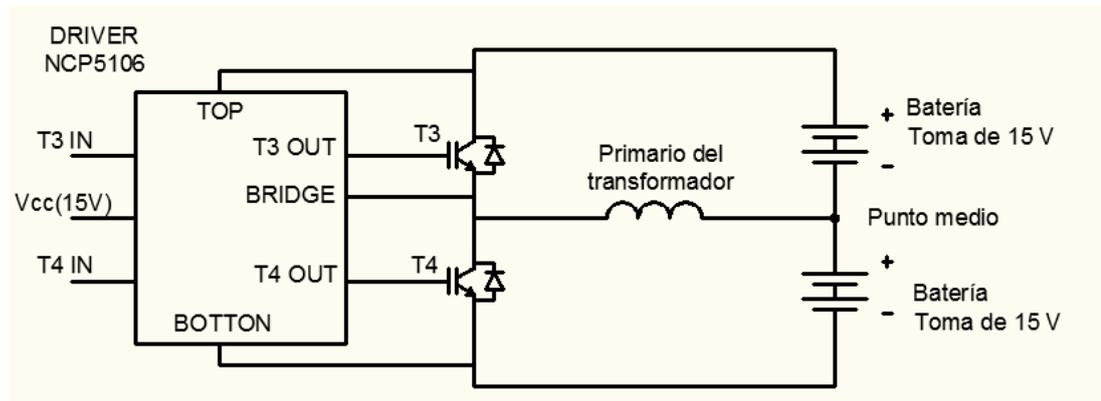


Figura 19. Esquema de conexión del driver para la fuente de alimentación

Este driver, así como otros componentes, han tenido que ser creados en OrCAD y/o Layout, para poder desarrollar los circuitos integrados que se representan en los planos.

6. CONCLUSIONES

Se ha diseñado la alimentación de los diferentes elementos del sistema de control, obteniendo tensiones estables y de calidad. La potencia aparente del transformador (50 VA) es de un valor bajo. Por lo tanto, su tamaño y peso, que son factores especialmente importantes para un vehículo, no van a ser demasiado elevados.

Comparada con la potencia desarrollada por el vehículo (hasta 75 kW), la potencia necesaria para alimentar el sistema de control es de un valor bajo (38,25 W), por lo que el rendimiento del sistema MES-AES también puede ser considerado alto en este aspecto.

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

PLANOS

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

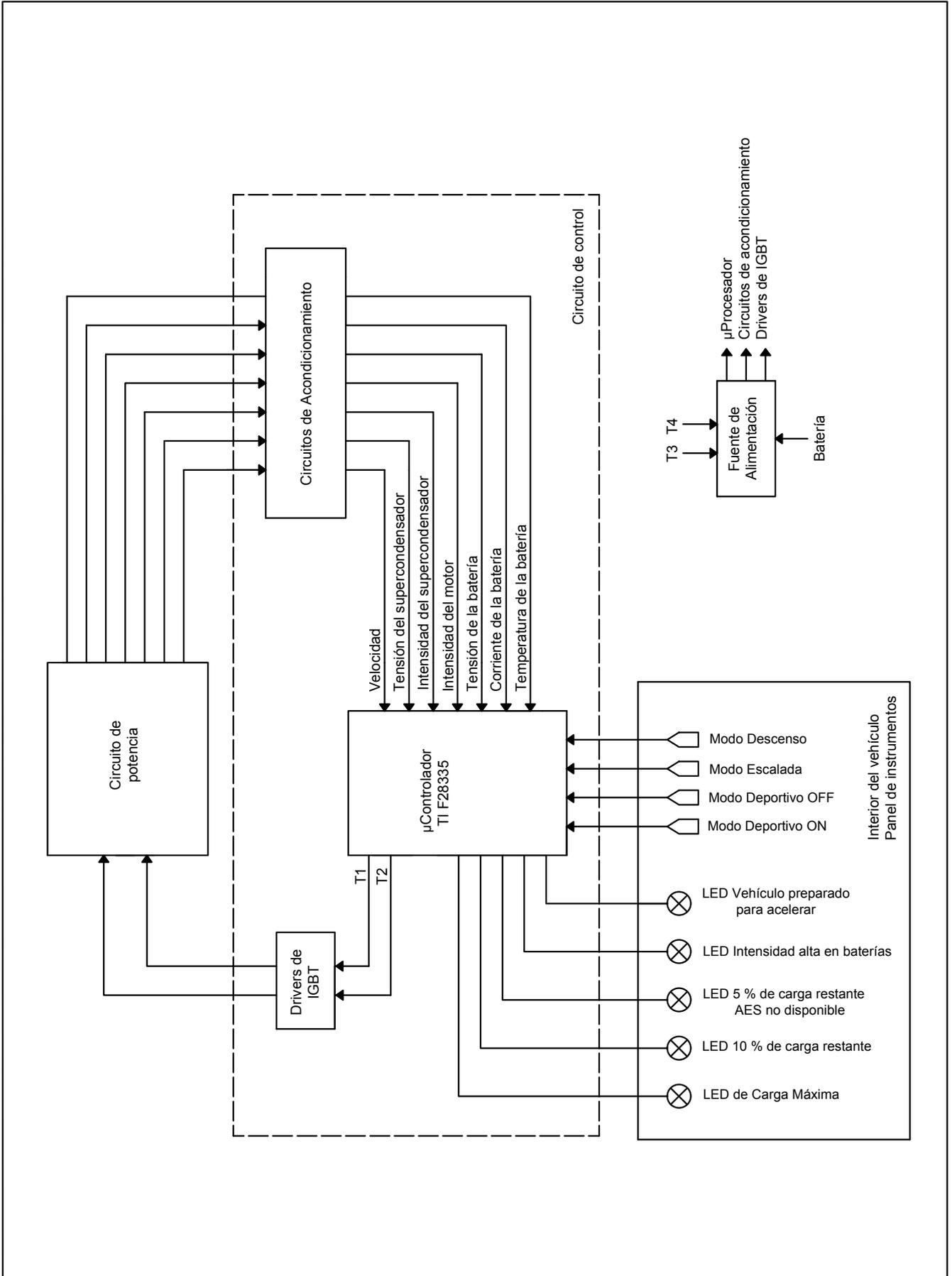
Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014

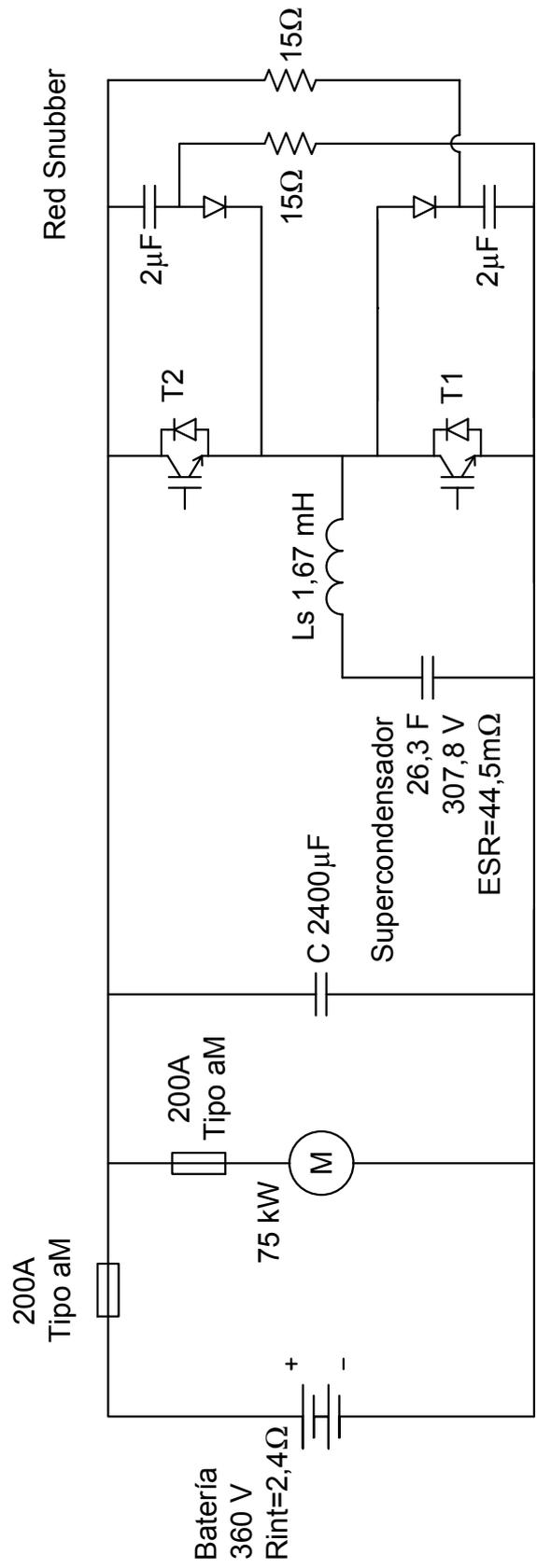


ÍNDICE DE PLANOS

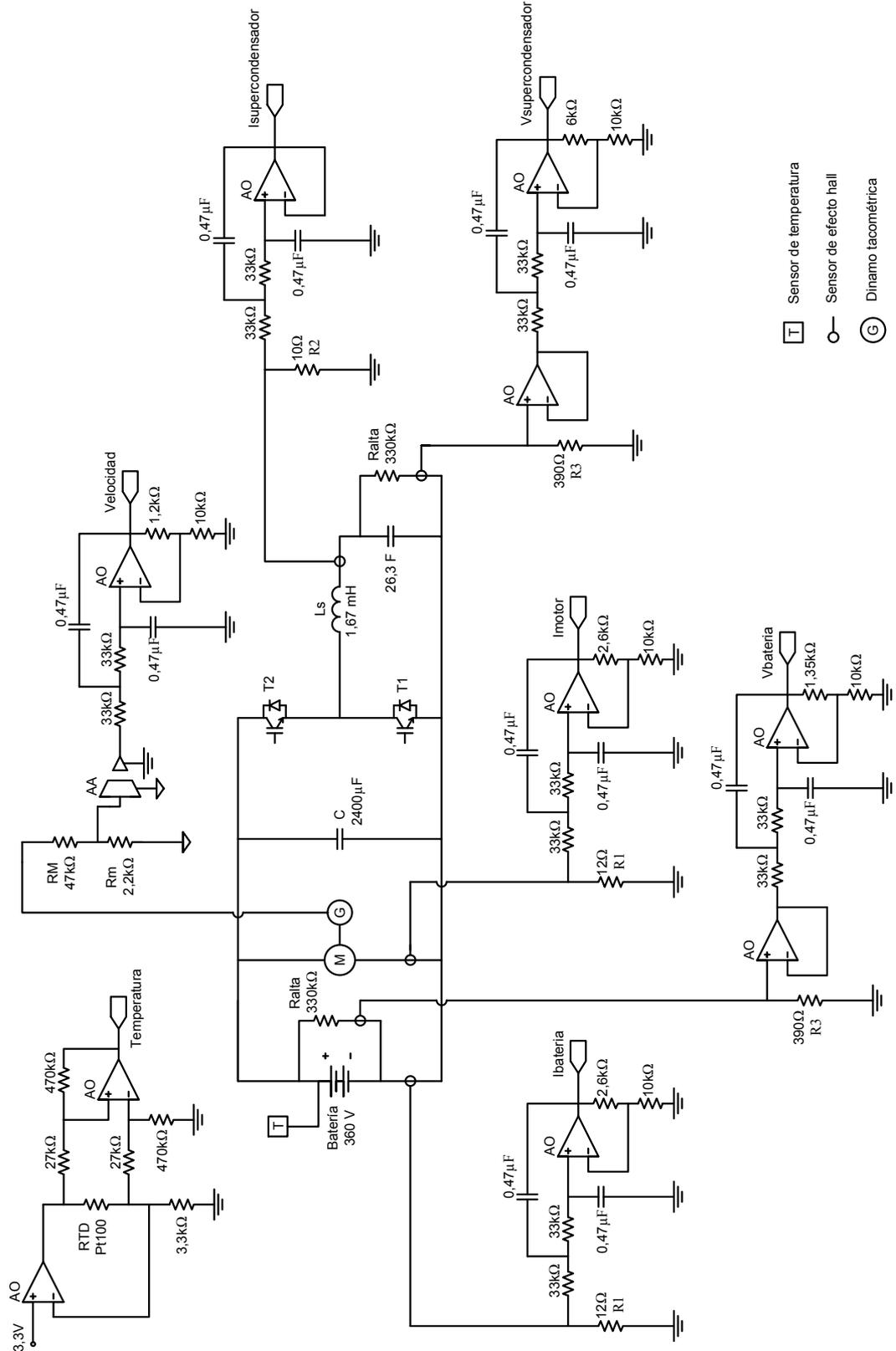
- 1. ESQUEMA GENERAL**
- 2. CIRCUITO DE POTENCIA Y PROTECCIONES**
- 3. CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO**
- 4. CIRCUITO IMPRESO DEL CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO**
- 5. CIRCUITO DEL DSP, ENTRADAS Y SALIDAS**
- 6. CIRCUITO IMPRESO DEL DSP, ENTRADAS Y SALIDAS**
- 7. FUENTE DE ALIMENTACIÓN AUXILIAR**
- 8. CIRCUITO IMPRESO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN AUXILIAR**
- 9. CIRCUITO IMPRESO. MEDIDA DE LA TEMPERATURA**
- 10. ESQUEMA DE CONEXIÓN DE LOS DRIVERS DEL CIRCUITO DE POTENCIA Y FUENTE DE ALIMENTACIÓN**



Fernando González Campo	Dibujado		UNIVERSIDAD DE BURGOS GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA
	Comprobado		
Escala :	ESQUEMA GENERAL	TRABAJO DE FIN DE GRADO	
		PLANO N°: 1	

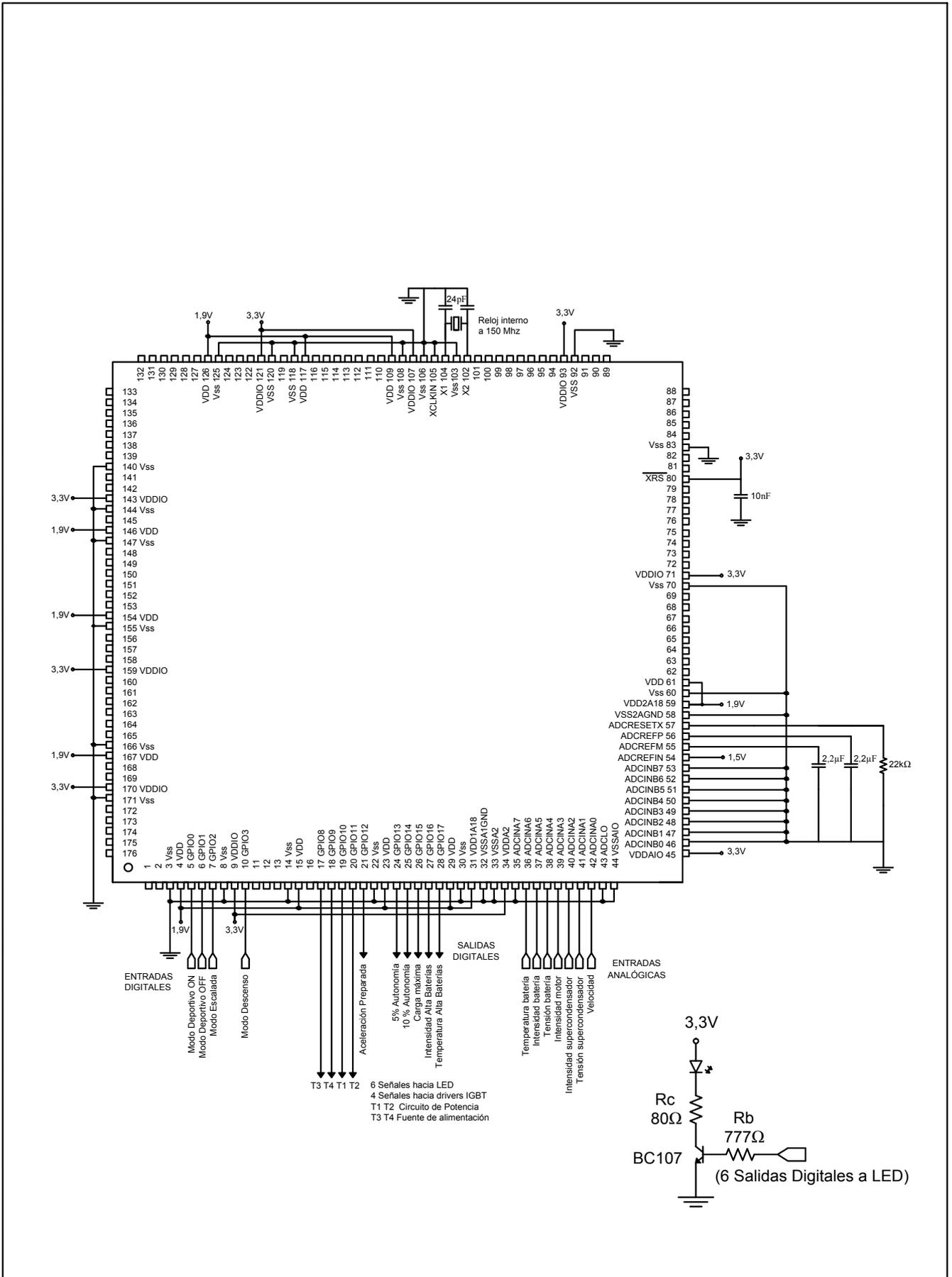


Fernando González Campo	Dibujado			UNIVERSIDAD DE BURGOS GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA
	Comprobado			
Escala :	CIRCUITO DE POTENCIA Y PROTECCIONES			TRABAJO DE FIN DE GRADO
				PLANO N°: 2

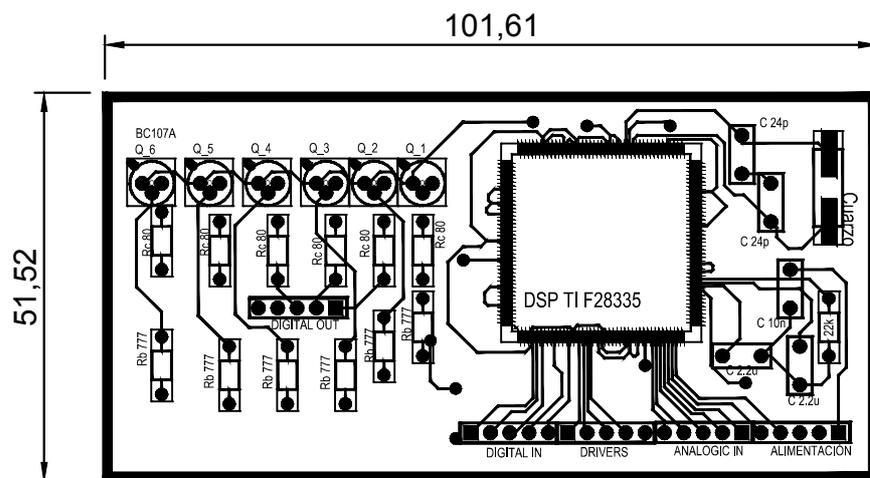


- T Sensor de temperatura
- O Sensor de efecto hall
- G Dinamo tacométrica

Fernando González Campo	Dibujado			UNIVERSIDAD DE BURGOS GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA
	Comprobado			
Escala :	CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO			TRABAJO DE FIN DE GRADO
				PLANO N°: 3

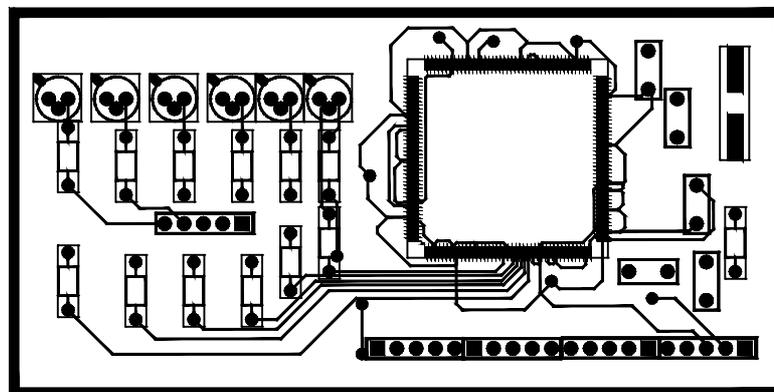


Fernando González Campo	Dibujado		UNIVERSIDAD DE BURGOS GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA
	Comprobado		
Escala :	CIRCUITO DEL DSP, ENTRADAS Y SALIDAS		TRABAJO DE FIN DE GRADO
			PLANO N°: 5



TOP

BOTTOM



Fernando González
Campo

Dibujado

Comprobado

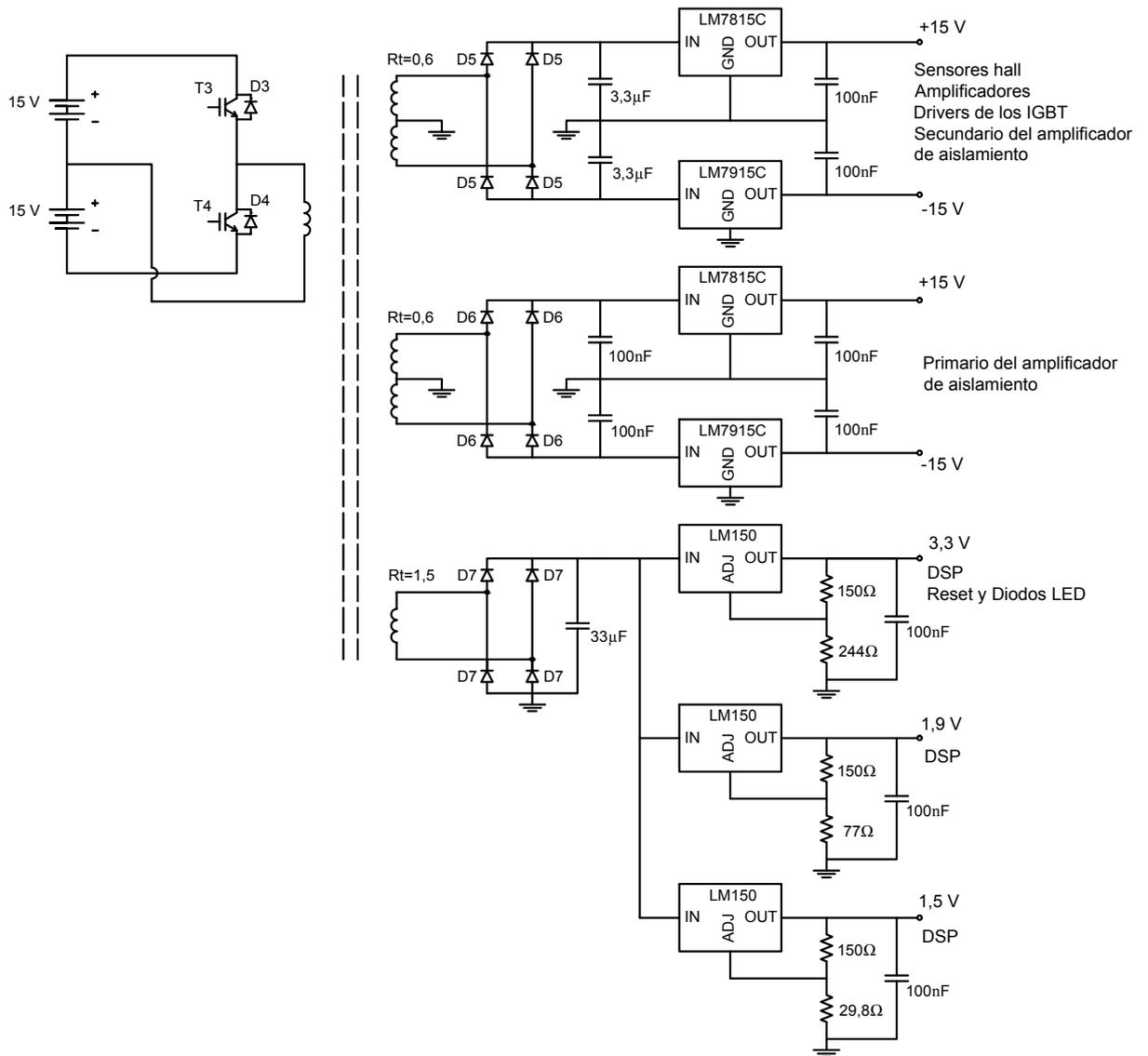
UNIVERSIDAD DE BURGOS
GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA

Escala :
1:1

CIRCUITO IMPRESO DEL DSP, ENTRADAS
Y SALIDAS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

PLANO N°: 6



Fernando González
Campo

Dibujado

Comprobado

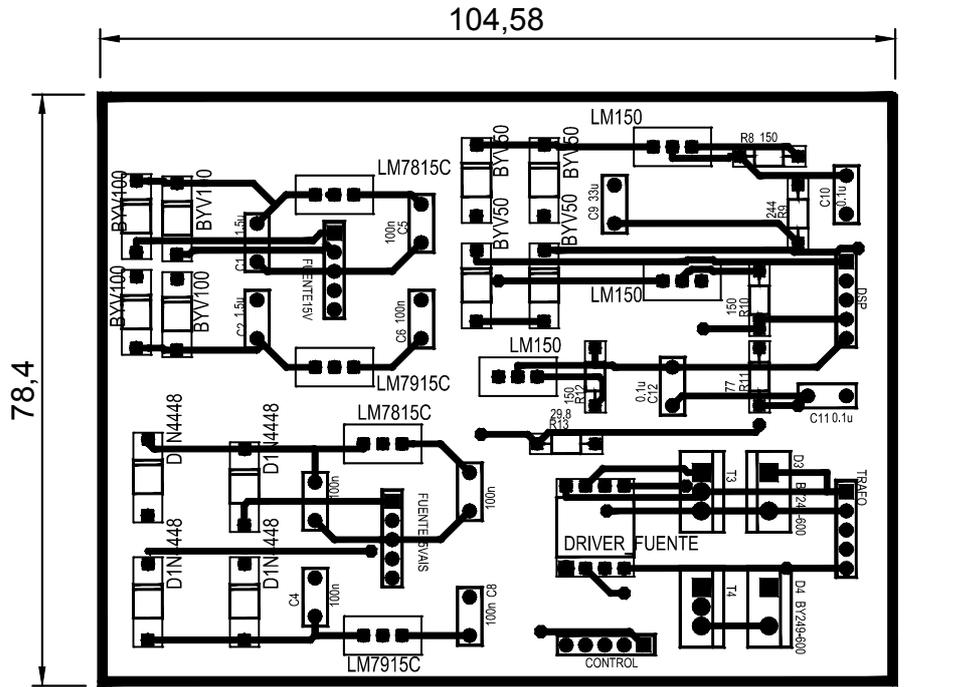
UNIVERSIDAD DE BURGOS
GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA

Escala :

FUENTE DE ALIMENTACIÓN AUXILIAR

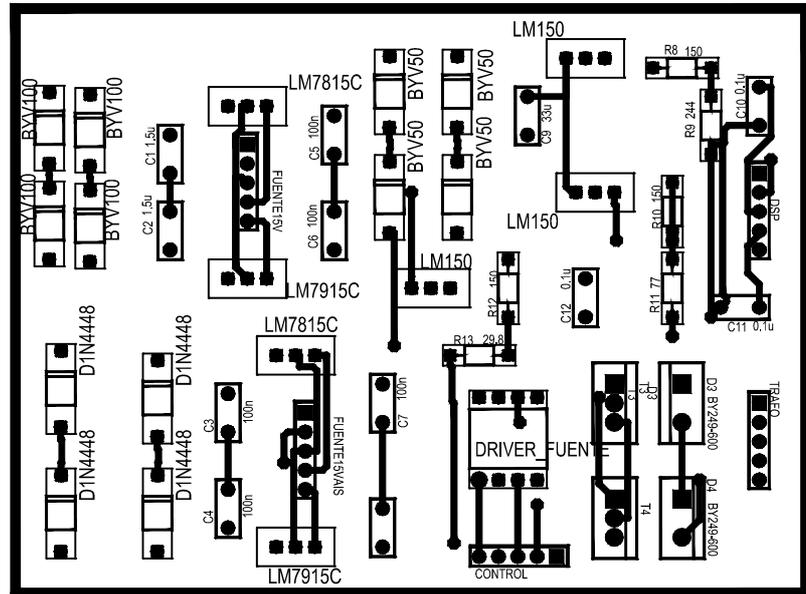
TRABAJO DE FIN DE GRADO

PLANO Nº: 7



TOP

BOTTOM



Fernando González
Campo

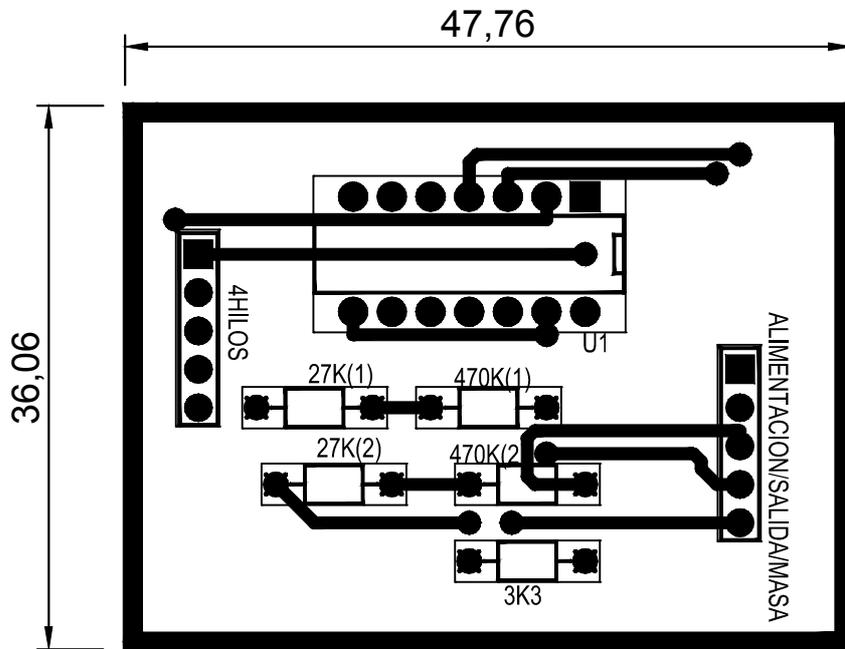
Dibujado
Comprobado

UNIVERSIDAD DE BURGOS
GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA

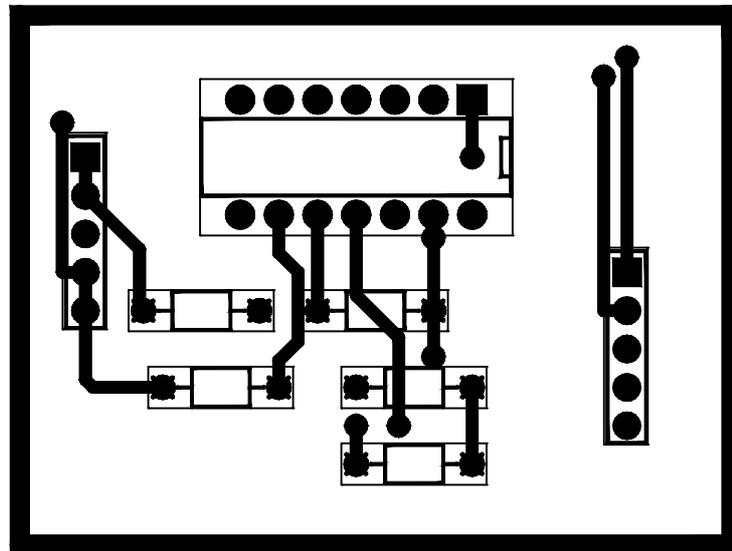
Escala :
1:1

CIRCUITO IMPRESO DE LA FUENTE DE
ALIMENTACIÓN AUXILIAR

TRABAJO DE FIN DE GRADO
PLANO Nº: 8



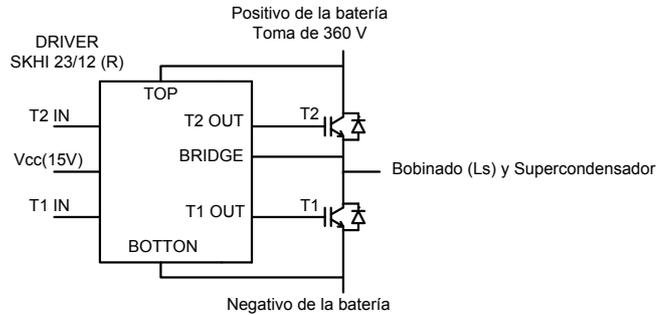
TOP



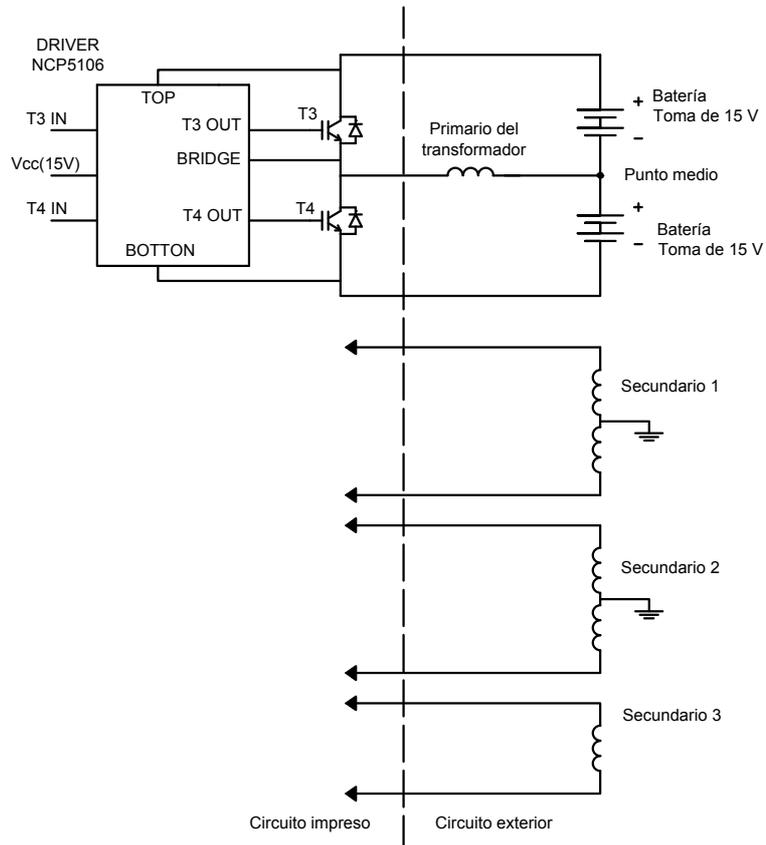
BOTTOM

Fernando González Campo	Dibujado			UNIVERSIDAD DE BURGOS GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA
	Comprobado			
Escala : 2:1	CIRCUITO IMPRESO. MEDIDA DE LA TEMPERATURA			TRABAJO DE FIN DE GRADO
				PLANO Nº: 9

CIRCUITO DE POTENCIA



FUENTE DE ALIMENTACIÓN



Fernando González Campo	Dibujado			UNIVERSIDAD DE BURGOS GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA
	Comprobado			
Escala :	ESQUEMA DE CONEXIÓN DE LOS DRIVERS DEL CIRCUITO DE POTENCIA Y DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN			TRABAJO DE FIN DE GRADO
				PLANO N°: 10

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

PRESUPUESTO

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1.	MEDICIONES.....	2
1.1.	Mediciones del circuito de potencia.....	2
1.2.	Mediciones del circuito del microcontrolador.....	2
1.3.	Mediciones del circuito de acondicionamiento.....	3
1.4.	Mediciones de la fuente de alimentación auxiliar.....	4
2.	CUADROS DE PRECIOS	5
2.1.	Precios unitarios en cifra y letra	5
2.1.1.	Precios unitarios del circuito de potencia.....	5
2.1.2.	Precios unitarios del circuito del microcontrolador	5
2.1.3.	Precios unitarios del circuito de acondicionamiento.....	6
2.1.4.	Precios unitarios de la fuente de alimentación auxiliar.....	6
2.2.	Aplicación de precios	7
2.2.1.	Aplicación de precios del circuito de potencia	7
2.2.2.	Aplicación de precios del circuito del microcontrolador	8
2.2.3.	Aplicación de precios del circuito de acondicionamiento	8
2.2.4.	Aplicación de precios de la fuente de alimentación auxiliar	9
3.	PRESUPUESTO TOTAL.....	10
3.1.	Presupuesto de control de calidad	10
3.2.	Costes de diseño	11
3.3.	Presupuesto de Ejecución Material (PEM).....	11
3.4.	Presupuesto de Ejecución por Contrata	11



1. MEDICIONES

Se ha calculado el presupuesto para implementar el sistema AES, que complementaría a un sistema MES (baterías, motor e inversor) ya existente.

1.1. Mediciones del circuito de potencia

Designación	Valor/Identificación	Nº de Elementos	Descripción
Celdas del supercondensador	BCAP3000	114	Celda de 2,7 V y 3000 F
Convertidor CC/CC elevador-reductor	SEMiX302GB066HDs	1	T1 y T2. Corriente nominal 300 A y tensión máxima 600 V
C (Filtro)	2400 μ F	1	Condensador de Aluminio. 500 V máximos
Ls	1,67 mH	1	Fabricada con lámina de aluminio. Núcleo de fibra de vidrio
Red Snubber	Módulo SCM Tipo P y Tipo N	2	Malla para protección de IGBT. 300 A y 600 V máximos
Fusibles	SIBA NH 690 V	2	Fusibles tipo aM (acompañamiento de motor) de 200 A nominales
Radiador	Resistencia térmica menor a 0,136 K/W	1	Disipador de calor para el módulo IGBT
Drivers	SKHI 23/12 (R)	1	Drivers para IGBT. Incluye protección contra cortocircuitos

1.2. Mediciones del circuito del microcontrolador

Designación	Valor/Identificación	Nº de Elementos	Descripción
μ Controlador	TI F28335	1	Incluye multiplexor y convertor A/D
Cristal de cuarzo	30,035 MHz	1	Oscilador para generar el reloj interno del DSP
LED	LED56	6	LED para informar al usuario
Q	BC107	6	Transistor
Rb	80 Ω	6	Resistencia de base
Rc	777 Ω	6	Resistencia de colector
C (Reset)	10 nF	1	Condensador para el Reset
C (Reloj)	24 pF	2	Condensadores para el Reloj
C (Convertor A/D)	2,2 μ F	2	Condensadores para configurar el Convertor A/D
R (Convertor A/D)	22k Ω	1	Resistencia para configurar el Convertor A/D



1.3. Mediciones del circuito de acondicionamiento

Designación	Valor/Identificación	Nº de Elementos	Descripción
Sensor de corriente	HE200T3	3	Sensor de efecto hall. Rango de +/- 300 A
Sensor de tensión	LV100	2	Sensor de efecto hall (montaje con Ralta). Rango de +/- 20 mA
Sensor de temperatura	Pt100	1	100Ω a 0°C
Ralta	330kΩ	2	Resistencia en paralelo con batería y supercondensador. 1 W
RM	47kΩ	1	Resistencia para el divisor de tensión en la dinamo. 1/4 W
Rm	2,2kΩ	1	Resistencia para el divisor de tensión en la dinamo. 1/4 W
R1	12Ω	2	Resistencia en la salida del sensor HE200T3. 1/4 W
R2	10Ω	1	Resistencia en la salida del sensor HE200T3. 1/4 W
R3	390Ω	2	Resistencia en la salida del sensor LV100. 1/4 W
Rfiltro (33kΩ)	33kΩ	12	Resistencia para el filtro paso bajo
Cfiltro (0,47 μF)	0,47μF	12	Condensador para el filtro paso bajo
R (10 kΩ)	10kΩ	5	Resistencia para ajustar la ganancia a la entrada del conversor. Tolerancia 1 %
Rx - Dinamo	1,2kΩ	1	Resistencia para ajustar la ganancia y la señal a la entrada del conversor. Tolerancia 1 %
Rx - Corriente motor y batería	2,6 kΩ	2	Resistencia para ajustar la ganancia y la señal a la entrada del conversor. Tolerancia 1 %
Rx - Tensión batería	1,35kΩ	1	Resistencia para ajustar la ganancia y la señal a la entrada del conversor. Tolerancia 1 %
Rx - Tensión supercondensador	6kΩ	1	Resistencia para ajustar la ganancia y la señal a la entrada del conversor. Tolerancia 1 %
R-Lazo	3,3kΩ	1	Resistencia para el lazo de corriente. Tolerancia 1 %
R1 - Transductor de temperatura	27kΩ	2	Resistencia para aumentar la ganancia. Tolerancia 1 %
R2 - Transductor de temperatura	470kΩ	2	Resistencia para aumentar la ganancia Tolerancia. 1 %
AO	LM324	10	Amplificador operacional de propósito general
AA	ISO124	1	Amplificador de Aislamiento. Viso=1,5 kV

**1.4. Mediciones de la fuente de alimentación auxiliar**

Designación	Valor/Identificación	Nº de Elementos	Descripción
T3/T4	IRGBC20F	2	IGBT controlado por onda cuadrada
D3/D4	BY249-600	2	Diodos en antiparalelo con T3/T4
Drivers	NCP5106	1	Drivers para IGBT de la Fuente de Alimentación
Transformador	50 VA	1	Transformador de alta frecuencia y reducido tamaño
Disipadores	20 K/W	4	Radiadores para T3/T4 y D3/D4
D5	BYV27-100	4	Diodos para el puente rectificador. IFAV=2A VR=100V
D6	1N4448	4	Diodos para el puente rectificador. IFAV=200mA VR=100V
D7	BYV27-50	4	Diodos para el puente rectificador. IFAV=2A VR=50V
LM7815C	LM7815C	2	Regulador de tensión. Vo=+15V
LM7915C	LM7915C	2	Regulador de tensión. Vo=-15V
C (3,3uF)	3,3uF	2	Condensador para filtrar la señal de salida del rectificador
C (100 nF)	100 nF	9	Condensador para filtrar la señal de salida del regulador/rectificador
C (33uF)	33 uF	1	Condensador para filtrar la señal de salida del rectificador
LM150	LM150	3	Regulador de tensión. Vref=1,25 V
R (150Ω)	150Ω	3	Resistencias para regular la tensión de alimentación
R (244Ω)	244Ω	1	Resistencia para regular la tensión de alimentación a 3,3V
R (77Ω)	77Ω	1	Resistencia para regular la tensión de alimentación a 1,9V
R (29,8Ω)	29,8Ω	1	Resistencia para regular la tensión de alimentación a 1,5V



2. CUADROS DE PRECIOS

2.1. Precios unitarios en cifra y letra

2.1.1. Precios unitarios del circuito de potencia

Designación	Precio letra	Precio cifra (€)
Celdas del supercondensador	Cuarenta y tres euros con ochenta y tres céntimos	43,83 €
Módulo IGBT	Ochenta y cinco euros con treinta y tres céntimos	85,31 €
C (Filtro)	Ciento cuarenta y dos con ochenta y ocho céntimos	142,88 €
Ls	Ciento veinte euros	120 €
Red Snubber	Ocho euros	8 €
Fusibles	Treinta y ocho euros con treinta y tres céntimos	38,33 €
Radiador	Sesenta euros con sesenta y nueve céntimos	60,69 €
Drivers	Doscientos ocho euros con cuarenta y dos céntimos	208,42 €

2.1.2. Precios unitarios del circuito del microcontrolador

Designación	Precio letra	Precio cifra (€)
μControlador	Trescientos sesenta y tres euros con veintiocho céntimos	361,28 €
Cristal de cuarzo	Un euro con veinte céntimos	1,20 €
LED	Setenta y siete céntimos	0,77 €
Q	Ochenta y ocho céntimos	0,88 €
Rb	Tres céntimos	0,03 €
Rc	Tres céntimos	0,03 €
C (Reset)	Cuarenta y siete céntimos	0,47 €
C (Reloj)	Ocho céntimos	0,08 €
C (Convertor A/D)	Cincuenta y cinco céntimos	0,55 €
R (Convertor A/D)	Tres céntimos	0,03 €

**2.1.3. Precios unitarios del circuito de acondicionamiento**

Designación	Precio letra	Precio cifra (€)
Sensor de corriente	Sesenta y cuatro euros con treinta céntimos	64,30 €
Sensor de tensión	Treinta euros con sesenta y seis céntimos	30,66 €
Sensor de temperatura	Veintitrés euros con treinta y un céntimos	23,31 €
Ralta	Sesenta y cuatro céntimos	0,64 €
RM	Tres céntimos	0,03 €
Rm	Tres céntimos	0,03 €
R1	Tres céntimos	0,03 €
R2	Tres céntimos	0,03 €
R3	Tres céntimos	0,03 €
Rfiltro (33kΩ)	Tres céntimos	0,03 €
Cfiltro (0,47 μF)	Quince céntimos	0,15 €
R (10 kΩ)	Tres céntimos	0,03 €
Rx - Dinamo	Tres céntimos	0,03 €
Rx - Corriente motor y batería	Tres céntimos	0,03 €
Rx - Tensión batería	Tres céntimos	0,03 €
Rx - Tensión supercondensador	Tres céntimos	0,03 €
R-Lazo	Tres céntimos	0,03 €
R1-Transductor de temperatura	Tres céntimos	0,03 €
R2-Transductor de temperatura	Tres céntimos	0,03 €
AO	Dos euros con sesenta y un céntimos	2,61 €
AA	Quince euros con trece céntimos	15,13 €

2.1.4. Precios unitarios de la fuente de alimentación auxiliar

Designación	Precio letra	Precio cifra (€)
T3/T4	Dos euros con catorce céntimos	2,14 €
D3/D4	Dos euros con treinta y cuatro céntimos	2,34 €
Drivers	Setenta y seis céntimos	0,76 €
Transformador	Ciento sesenta euros con noventa y tres céntimos	160,93 €
Disipadores	Un euro con sesenta y siete céntimos	1,67 €
D5	Dieciséis céntimos	0,16 €
D6	Dos céntimos	0,02 €
D7	Dieciséis céntimos	0,16 €
LM7815C	Cincuenta y siete céntimos	0,57 €
LM7915C	Un euro con veintiún céntimos	1,21 €



Designación	Precio letra	Precio cifra (€)
C (3,3uF)	Setenta y seis céntimos	0,76 €
C (100 nF)	Siete céntimos	0,07 €
C (33uF)	Un euro cincuenta y cuatro céntimos	1,54 €
LM150	Ochenta y ocho céntimos	0,88 €
R (150Ω)	Tres céntimos	0,03 €
R (244Ω)	Cinco céntimos	0,05 €
R (77Ω)	Cinco céntimos	0,05 €
R (29,8Ω)	Tres céntimos	0,03 €

2.2. Aplicación de precios

Se ha decidido incluir aquí el coste de montaje (mano de obra y maquinaria), que se ha estimado.

2.2.1. Aplicación de precios del circuito de potencia

Designación	Valor/Identificación	Nº de Elementos	Precio Unitario	Precio (€)
Celdas del supercondensador	BCAP3000	114	43,83 €	4.996,62 €
Módulo IGBT	SEMiX302GB066HDs	1	85,31 €	85,31 €
C (Filtro)	2400 µF	1	142,88 €	142,88 €
Ls	1,67 mH	1	120 €	120 €
Red Snubber	Módulo SCM Tipo P y Tipo N	2	8 €	16 €
Fusibles	SIBA NH 690 V	2	38,33 €	76,66 €
Radiador	Menor a 0,136 K/W	1	60,69 €	60,69 €
Drivers	SKHI 23/12 (R)	1	208,42 €	208,42 €
Total				5.706,58 €

Circuito de Potencia		
Coste de los componentes materiales necesarios		5.706,58 €
Mano de obra	4 horas de técnico - 20 €/h	80,00 €
	4 hora / 2 peones - 10 €/h	80,00 €
Maquinaria	Pequeña grúa y otras herramientas manuales	25,00 €
Total del Circuito de Potencia		5.891,58 €



2.2.2. Aplicación de precios del circuito del microcontrolador

Designación	Valor/Identificación	Nº de Elementos	Precio Unitario	Precio (€)
µControlador	TI F28335	1	361,28 €	361,28 €
Cristal de cuarzo	30,035 MHz	1	1,20 €	1,20 €
LED	LED56	6	0,77 €	4,62 €
Q	BC107	6	0,88 €	5,28 €
Rb	80Ω	6	0,03 €	0,18 €
Rc	777Ω	6	0,03 €	0,18 €
C (Reset)	10 nF	1	0,47 €	0,47 €
C (Reloj)	24 pF	2	0,08 €	0,16 €
C (Convertor A/D)	2,2µF	2	0,55 €	1,10 €
R (Convertor A/D)	22kΩ	1	0,03 €	0,03 €
			Total	374,50 €

Circuito del Microcontrolador		
Coste de los componentes materiales necesarios		374,50 €
Montaje (Conexiones)	2 horas de peón especialista - 15 €/h	30,00 €
Maquinaria	Equipo para soldado	5,00 €
Total del Circuito del Microcontrolador		409,50 €

2.2.3. Aplicación de precios del circuito de acondicionamiento

Designación	Valor/Identificación	Nº de Elementos	Precio Unitario	Precio (€)
Sensor de corriente	HE200T3	3	64,30 €	192,90 €
Sensor de tensión	LV100	2	30,66 €	61,32 €
Sensor de temperatura	Pt100	1	23,31 €	23,31 €
Ralta	330kΩ	2	0,64 €	1,28 €
RM	47kΩ	1	0,03 €	0,03 €
Rm	2,2kΩ	1	0,03 €	0,03 €
R1	12Ω	2	0,03 €	0,06 €
R2	10Ω	1	0,03 €	0,03 €
R3	390Ω	2	0,03 €	0,06 €
Rfiltro (33kΩ)	33kΩ	12	0,03 €	0,36 €
Cfiltro (0,47 µF)	0,47µF	12	0,15 €	1,80 €
R (10 kΩ)	10kΩ	5	0,03 €	0,15 €
Rx - Dinamo	1,2kΩ	1	0,03 €	0,03 €



Designación	Identificación	Nº de Elementos	Precio Unitario	Precio (€)
Rx - Corriente motor y batería	2,6 kΩ	2	0,03 €	0,06 €
Rx - Tensión batería	1,35kΩ	1	0,03 €	0,03 €
Rx - Tensión supercondensador	6kΩ	1	0,03 €	0,03 €
R-Lazo	3,3kΩ	1	0,03 €	0,03 €
R1-Transductor temperatura	27kΩ	2	0,03 €	0,06 €
R2-Transductor temperatura	470kΩ	2	0,03 €	0,06 €
AO	LM324	10	2,61 €	26,10 €
AA	ISO124	1	15,13 €	15,13 €
			Total	322,86 €

Circuito de Acondicionamiento		
Coste de los componentes materiales necesarios		322,86 €
Montaje (Conexiones)	2,5 horas de peón especialista - 15 €/h	37,50 €
Maquinaria	Equipo para soldado	5,00 €
Total del Circuito de Acondicionamiento		365,36 €

2.2.4. Aplicación de precios de la fuente de alimentación auxiliar

Designación	Valor/Identificación	Nº de Elementos	Precio Unitario	Precio (€)
T3/T4	IRGBC20F	2	2,14 €	4,28 €
D3/D4	BY249-600	2	2,34 €	4,68 €
Drivers	NCP5106	1	0,76 €	0,76 €
Transformador	50 VA	1	160,93 €	160,93 €
Disipadores	20 K/W	4	1,67 €	6,68 €
D5	BYV27-100	4	0,16 €	0,64 €
D6	1N4448	4	0,02 €	0,08 €
D7	BYV27-50	4	0,16 €	0,64 €
LM7815C	LM7815C	2	0,57 €	1,14 €
LM7915C	LM7915C	2	1,21 €	2,42 €
C (3,3uF)	3,3uF	2	0,76 €	1,52 €
C (100 nF)	100 nF	9	0,07 €	0,63 €
C (33uF)	33 uF	1	1,54 €	1,54 €
LM150	LM150	3	0,88 €	2,64 €
R (150Ω)	150Ω	3	0,03 €	0,09 €
R (244Ω)	244Ω	1	0,05 €	0,05 €
R (77Ω)	77Ω	1	0,05 €	0,05 €
R (29,8Ω)	29,8Ω	1	0,03 €	0,03 €
			Total	188,80 €



Circuito de Alimentación		
Coste de los componentes materiales necesarios		188,80 €
Montaje (Conexiones)	1 horas de peón especialista - 15 €/h	15,00 €
Maquinaria	Equipo para soldado	5,00 €
Total del Circuito de Alimentación		208,80 €

3. PRESUPUESTO TOTAL

3.1. Sobre el presupuesto de control de calidad

Las tareas concernientes al control de calidad son las siguientes.

Antes del montaje:

- ✓ Certificación del buen estado de los componentes.
- ✓ Comprobación de la capacidad de las celdas del supercondensador (tolerancia máxima del 20 %).

Durante y tras el montaje

- ✓ Examen visual general de su aspecto.
- ✓ Comprobación de las dimensiones.
- ✓ Comprobación de las conexiones de los elementos.
- ✓ Pruebas de funcionamiento y activación.

Dado el número y complejidad de las tareas necesarias, en total se ha estimado que el control de calidad supone un 2 % del total.



3.2. Costes de diseño

Los costes de diseño estimados, que se repartirían por el número de unidades vendidas, son los siguientes:

Actividad	Tiempo dedicado
Estudio previo	120
Diseño del circuito de potencia	100
Diseño del circuito de control	150
Diseño del circuito de acondicionamiento y control	80
Diseño de la fuente de alimentación	20
Simulaciones	50
Realización del proyecto técnico	60
Suma	580
Total (25 €/h)	14.500,00 €

3.3. Presupuesto de Ejecución Material (PEM)

Circuito de Potencia	5.891,58 €
Circuito del Microcontrolador	409,50 €
Circuito de Acondicionamiento	365,36 €
Circuito de Alimentación	208,80 €
Costes de diseño	14.500,00 €
Total	21.375,24 €
Control de Calidad	2 %
Presupuesto de Ejecución Material	21.802,74 €

Ascende el Presupuesto de Ejecución Material (PEM) a la citada cantidad de veintiún mil ochocientos dos euros con setenta y cuatro céntimos

3.4. Presupuesto de Ejecución por Contrata

Presupuesto de Ejecución Material (PEM)	21.802,74 €
Gastos Generales (15 %)	3.270,41 €
Beneficio Industrial (6 %)	1.308,16 €
Total sin IVA	26.381,32 €
IVA (21 %)	5.540,08 €
PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	31.921,40 €



Asciende el Presupuesto Total de Ejecución por Contrata del prototipo del Sistema MES-AES para Vehículo Eléctrico a la citada cantidad de treinta y un mil novecientos veintiún euros con cuarenta céntimos.

Burgos, a fecha 10 de mayo de 2014

Fernando González Campo

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

PLIEGO DE CONDICIONES

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1. OBJETIVOS DEL PLIEGO	2
2. NORMATIVAS DE OBLIGADO CUMPLIMIENTO	2
3. PRESCRIPCIONES ECONÓMICAS.....	3
3.1. Contrato	3
3.2. Abonos y precios.....	3
3.3. Rescisión.....	3
4. PRESCRIPCIONES FACULTATIVAS. RESPONSABILIDADES DEL DIRECTOR DE EJECUCIÓN	4
5. PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARTICULARES	6
5.1. Descripción e interpretación del proyecto	6
5.2. Condiciones de los materiales	6
5.2.1. Modificaciones a los planos y materiales	8
5.3. Ejecución del proyecto.....	9
5.4. Disposiciones generales o finales	9
5.4.1. Montaje y mantenimiento. Disposiciones de seguridad a tener en cuenta ..	10
5.4.2. Traslado y reciclado de baterías de litio y otros elementos	11
5.4.3. Manual de uso.....	12
5.4.4. Pruebas y recepción.....	12
5.4.5. Garantía.....	13



1. OBJETIVOS DEL PLIEGO

Este pliego de condiciones tiene por objeto establecer un conjunto de prescripciones de tipo técnico, facultativo, económico y legal que serán vinculantes al contratista durante la ejecución del proyecto.

2. NORMATIVAS DE OBLIGADO CUMPLIMIENTO

El Director de Ejecución deberá cumplir tanto en los equipos suministrados, como en el montaje, toda la normativa que afecte al cometido de sus trabajos. En este caso en particular conviene destacar:

- Reglamento de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT).
- Normas DIN 43.536; DIN 43.539; CEI/IEC 95-1, sobre la normativa a seguir en acumuladores, mediciones y métodos de carga.
- Normas de Compatibilidad Electromagnética. UNE-EN 61000-3-12.

También será de obligado cumplimiento la reglamentación medioambiental que afecta a los equipos electrónicos en España, en concreto cabe mencionar:

- Real Decreto 208/2005, de 25 de Febrero.
- Directiva 2002/96/CE, Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos.

El contratista deberá a cumplir todas las ordenanzas de carácter social y seguridad que estén estipuladas. Recabará de las autoridades los permisos necesarios y su puesta en servicio, no pudiendo exigir indemnización alguna por tal motivo.

El contratista es el único responsable del incumplimiento de las disposiciones vigentes en la materia laboral respecto de su personal y por tanto, de los accidentes que puedan sobrevenir y de los derechos que puedan derivarse de ellos.

Es competencia y responsabilidad del Director de Ejecución la revisión de proyecto, antes de realizar ningún pedido ni ejecutar ningún montaje y su denuncia a la Dirección y Propietario, de cualquier concepto no compatible con la correspondiente reglamentación exigida.



3. PRESCRIPCIONES ECONÓMICAS

3.1. Contrato

En caso de disconformidad con relación a las condiciones de contrato, la Dirección Técnica determinará la prioridad de una respecto a la otra.

Cualquier reglamento oficial tiene preferencia respecto al presente Pliego de Condiciones.

3.2. Abonos y precios

Los abonos tanto de las liquidaciones parciales como de la liquidación total del proyecto, estando previamente y perfectamente fijadas en el contrato, deberán ser verificados por la administración dentro de las fechas establecidas, habiendo sido certificadas por la Dirección Técnica.

Serán de carácter contractual los precios de las unidades que integren el proyecto, las cuales serán presentadas por el contratista al formalizar el contrato.

3.3. Rescisión

Si la ejecución no fuese adecuada o si el material presentado no reuniese las condiciones necesarias, la Dirección Técnica podrá solicitar la rescisión de la Contrata.

En este caso se fijará un plazo para determinar las actuaciones cuya paralización pudiese perjudicar sin que durante este plazo se empiecen los trabajos. No se abonarán los acopios que se hubiesen efectuado.

De ninguna forma podrán ser suspendidos los trabajos ni ejecutados de forma no acorde a la establecida por parte del contratista debido al retraso en los pagos, pudiéndose establecer penalizaciones si esto sucediera.



4. PRESCRIPCIONES FACULTATIVAS. RESPONSABILIDADES DEL DIRECTOR DE EJECUCIÓN

El Director de Ejecución es responsable de ejecutar correctamente el montaje, siguiendo siempre las directrices y normas del director técnico, no pudiendo sin su autorización variar trazados, cambiar materiales o introducir modificaciones al proyecto.

Manifiestará expresamente que encuentra el proyecto correcto o no, en su defecto se entiende que el proyecto es conocido y ha sido debidamente estudiado y que lo encuentra completo, correcto y acorde con las normativas oficiales vigentes en toda su extensión, para obtener las características que se fijan en los documentos del proyecto.

Aún lo expresado en puntos anteriores, si el Director de Ejecución encontrase falta, error u omisión en el proyecto durante la ejecución de los trabajos, tendrá la obligación de comunicarlo de inmediato a la Dirección Técnica.

Es responsable de efectuar el montaje cumpliendo fielmente la legislación vigente, especialmente el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión y el apartado de Seguridad e Higiene, así como la normativa relacionada específicamente.

Es responsable de la confección en el modo, tiempo y forma de la documentación necesaria para la legalización del proyecto y la dirección de obra, así como de la mejor gestión ante los organismos oficiales y compañías suministradoras, para obtener las correspondientes aprobaciones a la documentación presentada.

Es responsable de efectuar las pruebas mínimas exigidas por la legislación, las especificadas en el apartado correspondiente de este documento (ver apartado 5.4.4) y aquellas otras que el director técnico considere necesarias, asumiendo los costes de su realización.

Es responsabilidad del Director de Ejecución asegurar al titular las garantías especificadas y realizar las comprobaciones, reparaciones o sustituciones necesarias en el plazo mínimo posible.

El Director de Ejecución es responsable de realizar un correcto uso del proyecto, respetando la propiedad intelectual del autor, no realizará copias sin autorización, y en todo caso presentará las permitidas al director técnico para su visado. Asimismo,



se compromete a no divulgar el contenido del proyecto a terceros y sin otro fin que no sea la ejecución del montaje.

El Director de Ejecución se responsabilizará de conocer en todos sus extremos y totalidad el proyecto, en base a lo cual lo asumirá como completo, correcto y acorde con las normativas y los fines previstos, asumiendo igualmente la responsabilidad de los dimensionamientos, potencias, cálculos e idoneidad de los sistemas.

Igualmente asumirá las mediciones, extensión y definiciones de la relación de materiales y presupuesto, aceptando estos como correctos y suficientes para la estricta ejecución de la instalación, según proyecto y sujeto en todo caso a la interpretación que pueda realizar la Dirección Facultativa.



5. PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARTICULARES

5.1. Descripción e interpretación del proyecto

La interpretación del proyecto, en sus documentos: memoria, planos, presupuesto y pliego, es competencia exclusiva del ingeniero autor o en su defecto del ingeniero director de obra.

Todos los documentos, memoria y anexos, presupuesto, planos y pliego son parte del proyecto, en caso de una posible discrepancia entre los anteriores, prevalecerá el criterio que la Dirección de Obra determine.

En todo momento los planos de proyecto quedan confiados personalmente al Director de Ejecución, no estando permitida la reproducción de los mismos, más que para fines de montaje y en otros casos siempre bajo autorización escrita.

Todos estos planos sólo tendrán validez, si están aprobados por la Dirección de la Obra, no efectuándose ningún montaje si no existe el correspondiente plano.

5.2. Condiciones de los materiales

Todos los componentes deberán reunir las condiciones y características necesarias según estén determinadas en sus respectivos planos u otros documentos del proyecto. A continuación se hará referencia a estas especificaciones.

La Dirección Técnica a cargo de la ejecución del proyecto será la responsable de verificar que todos los componentes cumplen sus especificaciones requeridas.

➤ Batería ion-litio

Tensión nominal media: 360 V.

Corriente nominal: 60 A.

El rango de temperatura de funcionamiento recomendable de la batería estará comprendido entre -20°C y 50°C.



➤ **Supercondensador**

Tensión nominal a carga completa: 307,8 V.

Capacidad total: 26,3 F.

Capacidad de las células individuales: 3000 F.

Tolerancia máxima de la capacidad de las células individuales: 20 %

Si no se cumple esa condición esa célula deberá ser retirada y no empleada para el montaje del banco de supercondensadores.

➤ **Módulo IGBT-Diodo**

Corriente nominal: 300 A

Tensión colector-emisor: 600 V

Temperatura máxima de la unión de IGBT y diodo: 175 °C

➤ **Disipador del módulo IGBT-Diodo**

La resistencia térmica deberá ser menor a 0,136 K/W para que el módulo trabaje varias decenas de grados por debajo de su temperatura máxima y garantizar su fiabilidad.

➤ **Elementos del sistema de control**

Los sensores hall y el amplificador de aislamiento tendrán un aislamiento mínimo de 600 V. Las resistencias utilizadas en los diferentes circuitos de acondicionamiento tendrán una tolerancia no superior al 1 %.

➤ **Fuente de Alimentación**

Los condensadores utilizados con este propósito deberán soportar como mínimo 100 V de tensión. Los semiconductores deberán soportar los valores de corriente media y tensión inversa correspondientes y calculados para cada uno de ellos.

El transformador no será inferior a 50 VA y deberá ser capaz de trabajar a frecuencias de 20 KHz. Los bobinados tendrán la relación de transformación que se indica en el anexo correspondiente (anexo N°14).



➤ Conductores

Debido a las altas corrientes y altas frecuencias de conmutación deberán ser especialmente dimensionados para la aplicación. Para reducir las inductancias parásitas y sobretensiones que se generan, los conductores de potencia deberán ser fabricados a base de láminas de cobre, de un promedio de 1 mm de espesor y 2,5 cm de ancho.

Para evitar interferencias conductivas entre circuitos con consumos dispares la puesta a masa de los circuitos será puntual en paralelo. Para evitar interferencias por acoplamiento inductivo y capacitivo los cables de señal deberán estar alejados físicamente de los de potencia en la medida en que esto sea posible. En los casos en los que sea necesario (especialmente para las señales analógicas y de medida), los cables de señal deberán ir apantallados con una malla conductora conectada a masa, tal como se ve en la Figura 1.

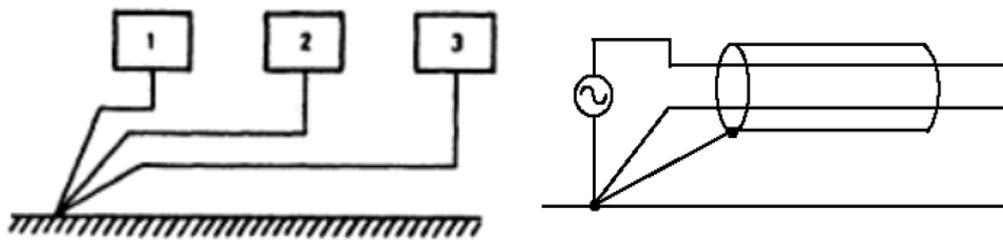


Figura 1. Puesta a masa puntual en paralelo y apantallamiento conectado a masa

Por último, tanto para reducir las inductancias parásitas, el coste material y las interferencias; la distribución física de los elementos del circuito deberá tratar de minimizar la longitud de los cables.

5.2.1. Modificaciones a los planos y materiales

Los componentes que se han seleccionado en este proyecto pueden modificarse por otros de características similares.

Las modificaciones deberán estar justificadas por mejoras en calidad o montaje de los diferentes elementos, siempre que no afecte al presupuesto o en todo caso este disminuya, no debiendo nunca repercutir esta modificación en otros elementos.



Estas posibles variaciones deberán realizarse por escrito acompañadas por la causa, elemento eliminado, elemento nuevo, modificaciones de precios y de fechas de entrega, no pudiéndose efectuar ningún cambio si el anterior documento no ha sido aprobado por la Propiedad y Dirección de Obra.

Los materiales o cualquier otro elemento en el que sea definible una calidad, será la indicada en el proyecto. Si el Director de Ejecución propusiese una de calidad similar, sólo la Dirección Técnica, definirá si es o no similar, por lo que todo elemento que no sea específicamente indicado en el presupuesto, deberá haber sido aprobado por escrito por aquella, siendo eliminado si no cumpliera este requisito.

5.3. Ejecución del proyecto

En este apartado se hace hincapié en aquellos aspectos relativos al montaje que hayan podido no quedar mencionados anteriormente.

Es importante mencionar que los diferentes elementos del proyecto deberán ir convenientemente sujetos y protegidos mecánicamente. Además, aquellos componentes que lo requieran, especialmente las células del supercondensador, deberán ir acolchados con almohadillas de caucho adhesivas de doble cara (o protección similar), con el objetivo de no sufrir el desgaste mecánico causado por las vibraciones que se generan en el vehículo. El acolchado deberá dejar espacio suficiente para no impedir la ventilación y disipación del calor en los elementos.

En el caso de que se tratase de desarrollar el proceso de automatización para la fabricación del sistema MES-AES en grandes volúmenes esta automatización no debe afectar a la calidad de las uniones entre elementos, seguridad de los acolchados y deberán cumplirse igualmente las tolerancias y el resto de prescripciones establecidas.

Una vez finalizado el montaje debe realizarse una revisión de las partes más importantes, ajustando o remplazando los elementos necesarios.

5.4. Disposiciones generales o finales

Este apartado pretende dar una serie de indicaciones generales sobre los elementos del proyecto: informar sobre la peligrosidad de los mismos, las medidas que se deben



tomar para evitar cualquier percance, instrucciones para el funcionamiento y forma de realizar el mantenimiento.

5.4.1. Montaje y mantenimiento. Disposiciones de seguridad a tener en cuenta

La zona para el montaje deberá estar ordenada y limpia, con acceso restringido a personas ajenas, que puedan desconocer las precauciones necesarias.

Las operaciones de corte o soldadura, en el caso de realizarse de forma manual, se realizarán utilizando visores, protectores faciales, etc., según corresponda en cada caso. Tras la operación de soldadura no se podrá utilizar oxígeno para realizar labores de limpieza y soplado. Además deberá haber siempre disponible un extintor apropiado, cercano a la zona de trabajo.

Los elementos como las baterías y supercondensadores deben ser tratados con el cuidado necesario, tanto por su coste como por su peligrosidad. Un golpe fuerte puede derramar los componentes internos de estos elementos, que pueden resultar moderadamente tóxicos y corrosivos e incluso inflamables, motivo por el que van fijados y acolchados en el montaje final.

En cuanto a las medidas de protección eléctrica, se deberá emplear calzado aislante y guantes, así como herramientas eléctricas aisladas. Asimismo, se deberán retirar del cuerpo elementos metálicos como anillos y relojes, ya que corrientes de cortocircuito pueden soldar los elementos y causar quemaduras graves. Las células deberán ser tomadas por la base, evitando el contacto con los bornes.

Se debe poner especial cuidado en respetar la polaridad de los elementos, cable rojo positivo y cable negro negativo. Se debe desconectar primero el borne negativo y conectarlo el último.

En el caso de trabajar en un taller u otro lugar donde puedan existir vapores de gasolina u otros líquidos inflamables se deben evitar chispas que pueda producir un incendio. Para ello se deben colocar cubiertas protectoras de hule sobre los bornes de la batería, evitando así que se produzcan chispas ante un contacto accidental con las herramientas de trabajo. Para limpiar los bornes se debe utilizar un cepillo plástico, ya que los cepillos metálicos pueden crear electricidad estática y chispas.



Una vez montados, el banco de supercondensadores y el paquete de baterías son elementos considerablemente pesados, por lo que se deben usar las técnicas y medios necesarios para levantarlos y manejarlos con seguridad, sin que se ocasione su caída o rotura; o se produzcan daños a los trabajadores. Además deben almacenarse en un lugar fresco, seco y limpio. Tanto en el montaje final como para su almacenamiento, se debe mantener ambos en posición vertical.

5.4.2. Traslado y reciclado de baterías de litio y otros elementos

En el caso de rotura de baterías y células del supercondensador durante el montaje se deberán tomar las medidas necesarias para su reciclado.

En cuanto al traslado de las baterías de litio, el empaquetado debe ser capaz de soportar una caída de 1,2 metros de altura. Además, las celdas deben ser empaquetadas por separado con los bornes protegidos por una cinta no conductora (o método similar), para evitar cortocircuitos o su activación, en el caso de que por cualquier motivo se encontrasen parcialmente cargadas. Dado que las baterías usadas en este proyecto poseen una alta capacidad requieren de una etiqueta de clase 9 y documentos de transporte de materiales peligrosos.

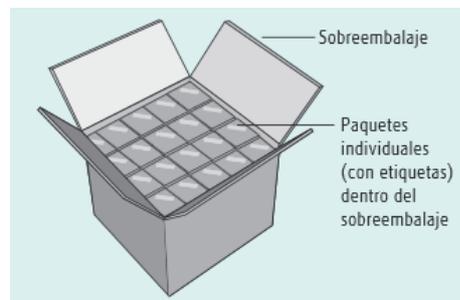


Figura 2. Empaquetado de baterías para su reciclado y transporte

En el caso de tener que deshacernos de algún otro elemento del proyecto deberán tomarse las medidas de seguridad, empaquetado y reciclado necesarias (ver Figura 2 para el caso de las baterías). Si las células del supercondensador no cumplieren la tolerancia que se exige en este proyecto (no cumplan con la tolerancia garantizada en su hoja de características) se podrá contactar con el fabricante, para obtener un recambio para las células defectuosas.



5.4.3. Manual de uso

Este apartado pretende establecer una serie de directrices para el correcto uso del sistema MES-AES diseñado, las cuáles podrían ser proporcionadas al cliente junto al resto de manuales del vehículo.

A diferencia de otros tipos de baterías, las baterías de litio no presentan efecto memoria y no necesitan descargarse por completo. Es recomendable y preferible que se realicen varias cargas de un par de horas en noches sucesivas (el cargador se desconecta cuando la carga llega al máximo) que una sola carga completa de 8 horas una vez a la semana. Esta metodología evita llevar a las baterías a profundidades de descarga innecesarias y permite disponer de una mayor autonomía media todos los días, permitiendo al usuario contar con la plena capacidad de las baterías ante cualquier imprevisto en su ruta habitual.

En cuanto a los modos de funcionamiento diseñados, para conseguir una mayor eficiencia y autonomía y alargar la vida de las baterías del vehículo, el usuario debe:

- Conectar con la suficiente anterioridad el Modo Deportivo y Escalada, si se desea alcanzar una velocidad alta o realizar un ascenso.
- Conectar el Modo Descenso cuando se realice un descenso prolongado y desconectarlo cuando se vaya a realizar un esfuerzo importante como pendientes ascendentes y aceleraciones.
- Desconectar el Modo Escalada cuando no sea necesario.

Se recuerda que la mayoría de los modos de funcionamiento se conectan y desconectan automáticamente, en función de la velocidad. El usuario del vehículo no tiene que estar pendiente continuamente de todos ellos.

5.4.4. Pruebas y recepción

El Director de Ejecución garantizará después de la terminación de los trabajos bajo este contrato, que todos los sistemas estén listos para una operación perfecta, de acuerdo con todos los términos legales y restricciones y de conformidad con la mejor práctica.



Además de cualquier otra referencia indicada en estas especificaciones, con relación a pruebas y puesta en marcha, el Director de Ejecución estará obligado por esta sección de las especificaciones, a probar, poner en marcha y dejar en perfecto orden de funcionamiento, todos los sistemas. Se realizarán los siguientes ensayos generales:

- ✓ Examen visual general de su aspecto.
- ✓ Comprobación de dimensiones.
- ✓ Comprobación de las conexiones de los elementos.
- ✓ Pruebas de funcionamiento y activación.

Una vez comprobado que el funcionamiento es el correcto, el proyecto está listo para su recepción.

5.4.5. Garantía

El Director de Ejecución garantizará que todos los materiales utilizados en la ejecución del proyecto, son nuevos y libres de defectos.

Deberá garantizar todos los materiales suministrados por un período de 1 año, a partir de la fecha de recepción y se comprometerá durante este período a reemplazar libre de costo alguno para la propiedad, cualquier material que resultase defectuoso.

Transcurrido dicho tiempo, la propiedad se reserva el derecho de contratar al adjudicatario, para proseguir con el mantenimiento.

Burgos, a fecha 03 de Abril de 2013

Fernando González Campo

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



ÍNDICE:

1.	INTRODUCCIÓN.....	2
➤	Análisis DAFO	3
2.	IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE, SUS NECESIDADES Y EXPECTATIVAS	3
2.2.	Versatilidad del sistema MES-AES.....	7
3.	ESTUDIO DE RENTABILIDAD	8
3.1.	Aspectos generales	8
3.1.1.	Coste de adquisición, subvenciones y forma de pago	8
3.1.2.	Combustible convencional y electricidad. Evolución de precios. Comparación..	10
3.1.3.	Tarifa Supervalve	12
3.2.	Cálculos	14
3.2.1.	Ahorro en combustible	14
3.2.2.	Ahorro por frenado regenerativo	15
3.2.3.	Diferencia en el coste de adquisición	16
3.2.4.	Necesidad de cambio de baterías	17
➤	Balance final. Resultados	17
➤	Amortización	18
4.	RENTABILIDAD. MES-AES DISEÑADO FRENTE AL SISTEMA MES HABITUAL	20
5.	CONCLUSIONES.....	22



1. INTRODUCCIÓN

Como todo proyecto no debe ser tan solo técnicamente posible, sino además económicamente viable, este apartado tiene una importancia vital, aunque no posea el carácter estrictamente técnico de alguno de los anteriores.

Ya que el sistema MES-AES se trata de un producto con un coste de producción alto y orientado a su fabricación y venta en grandes volúmenes, donde habría que invertir una considerable suma monetaria, se redobla la importancia de este apartado y el resto de anexos justificativos, que refuercen y aseguren la viabilidad del proyecto.

En el anexo N°5, *Estudio de impacto medioambiental*, se analiza el aspecto contaminante del vehículo convencional, siendo el vehículo eléctrico una alternativa mucho más ecológica. En ese anexo se explica también el hecho de que aunque la conciencia medioambiental se encuentra muy extendida y pudiese ser un motivo que justifique por sí sola la compra de un vehículo eléctrico, rara vez se da el caso.

Como también se explica en ese anexo, los tres principales motivos que impiden la proliferación del vehículo eléctrico en el mercado son la falta de puntos de recarga, su baja autonomía y su alto coste de adquisición. Se pone como ejemplo a los vehículos híbridos convencionales, que no presentan los dos primeros problemas y gracias al aumento de su demanda y la bajada de los costes de producción, están consiguiendo disminuir sus precios de venta.

El sistema MES-AES diseñado:

- Alarga la vida útil de las baterías, evitando tener que cambiarlas y realizar un desembolso mayor.
- Mejora el rendimiento durante las aceleraciones y frenados regenerativos.
- Aumenta la autonomía inicial y a largo plazo, debido a su mayor rendimiento y a que mantiene las baterías en mejor estado. La mejora del rendimiento también se verá reflejada en la factura eléctrica.

Es difícil estimar el aumento de ventas en los vehículos eléctricos debido exclusivamente a la incorporación de un sistema AES como el diseñado al sistema MES habitual. Lo que haremos será olvidar la parte medioambiental (que puede llegar a ser muy subjetiva) y considerar que el cliente solo comprará el vehículo eléctrico cuando este le salga rentable y útil.



➤ Análisis DAFO

Para el estudio del vehículo eléctrico se ha desarrollado un análisis DAFO, visible en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis DAFO del Vehículo Eléctrico

Vehículo eléctrico: Análisis DAFO	
Debilidades (Internas)	Fortalezas (Internas)
Baja autonomía (aprox. 200 km)	Menos contaminante
Mayor coste de adquisición	Posible ahorro a largo plazo a través del ahorro en combustible
Alto tiempo de recarga (4-8 h)	Menor ruido. Mayor confort Menor mantenimiento necesario
Amenazas (Externas)	Oportunidades (Externas)
Producto sustitutivo: Vehículos Híbridos	Subvenciones
Resistencia al cambio de los compradores	Otras políticas actuales y futuras a favor del vehículo eléctrico y en contra del convencional
Automóvil: Mercado muy competitivo. Dificil de introducir nuevos productos y competidores	Automóvil: Demanda relativamente alta y estable, generalmente creciente.
Falta de infraestructura de recarga	Vehículo eléctrico: Sector en desarrollo, con posibilidades de mejora

Los aspectos contaminantes, el ruido, la falta de infraestructura de recarga y el impacto sobre la red eléctrica del futuro aumento de vehículos eléctricos se han tratado ya el anexo N°5, *Estudio de impacto medioambiental*. En los siguientes apartados trataremos de analizar otros de los puntos a favor y en contra del vehículo eléctrico, su mercado, etc.

2. IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE, SUS NECESIDADES Y EXPECTATIVAS

Si estudiamos los datos de las encuestas del anexo *Estudio de impacto medioambiental*, podemos deducir que el cliente busca un vehículo eléctrico con las mismas características que uno convencional, tanto en precio como en autonomía y potencia del vehículo. El problema es que, con la tecnología actual, no es posible alcanzar ambos requisitos simultáneamente.

Por suerte, existen diferentes ayudas estatales para la compra de estos vehículos. Además, el alto precio del combustible convencional mejora la rentabilidad del vehículo eléctrico a largo plazo. La rentabilidad vendrá dada en función del número



y distancia de los trayectos realizados a lo largo de la vida útil del vehículo. Las ayudas estatales y el estudio de la rentabilidad se detallan y calculan más adelante.

Por otro lado, sigue estando el principal problema del vehículo eléctrico: su baja autonomía. Como ya se ha comentado, el sistema MES-AES diseñado mejora el rendimiento del vehículo y reduce la corriente y esfuerzos de las baterías. Estimamos que gracias al sistema diseñado, a medio-largo plazo (6-7 años) la autonomía del vehículo se mantendrá cerca de su valor inicial, o al menos no habrá bajado tanto en comparación con el sistema MES, que usa exclusivamente las baterías.

Pese a la mejora estimada, la autonomía inicial y máxima del vehículo va a depender fundamentalmente de las baterías empleadas. Actualmente un número aceptable de baterías (ni muy pesado ni muy caro) puede proporcionar autonomías inferiores a 300 km, lo que sigue estando lejos de la autonomía de los vehículos convencionales.

Por lo tanto, si se requieren hacer trayectos superiores, habrá que recargar el vehículo a medio trayecto. Existen diferentes modos de carga (16-32 A), pero requieren de varias horas para recargar el vehículo. Además, existe el riesgo de quedarse sin energía en medio de una ruta, sin posibilidad de recarga cercana.

Esta problemática produce el rechazo del cliente, acostumbrado a las prestaciones de los vehículos convencionales. Existen sistemas de recarga más rápida (30 minutos), pero son escasos y abusar de ellos perjudica a las baterías. El supercondensador utilizado en este trabajo puede absorber rápidamente esa energía, pero no tiene una gran capacidad de almacenamiento, por lo sigue sin solucionar este problema.

Otro de los problema es la escasez de puntos de recarga. En junio de 2011 había tan solo 558 puntos de recarga instalados en toda España. Además, el usuario no desea tener que estar pendiente de su vehículo mientras se recarga en un punto instalado por el ayuntamiento, dónde además el desembolso será mayor. Así pues, serán aquellos que disponen de garaje propio quienes se encontrarán más interesados en la adquisición de un vehículo eléctrico.

Pese a todos los impedimentos anteriores existen también datos a favor. Y es que la mayoría de los viajes que se realizan son trayectos cortos: de casa al trabajo, del trabajo a casa, al colegio de los niños, al centro comercial, etc. Son todos trayectos de carácter principalmente urbano, donde el vehículo eléctrico mejora su eficiencia



frente al vehículo convencional debido al alto número esperas y frenados regenerativos que se realizan.

En el caso de viajes desde el extrarradio o a una segunda residencia cercana, nuestro sistema MES-AES igualmente posee las características necesarias para funcionar en carretera abierta y alcanzar altas velocidades (autovías, etc.). A pesar de que el vehículo eléctrico sea incapaz de realizar viajes largos, estos son mucho menos frecuentes. Dado el caso, podría acudir eventualmente a otros medios (alquiler de vehículos, bus, trenes, etc.), aunque la mayoría de usuarios prefieren disponer de vehículo propio también para esos trayectos, aunque no los realicen habitualmente. En resumen, el cliente potencial del vehículo eléctrico es aquel que:

1. Realiza un gran número de trayectos medianos-cortos (aumentando la rentabilidad a través del ahorro en combustible).
2. No realiza trayectos largos de forma habitual.
3. Además disponga de un lugar apropiado para instalar un punto de recarga.

En España, quienes cumplen con estos requisitos son principalmente aquellas personas que viven en las afueras de las grandes ciudades o en pueblos situados a una distancia media (ej.: 20-60 km), teniendo que realizar diariamente recorridos de varias decenas de kilómetros. Es este segmento del mercado quién obtiene un mayor ahorro y utilidad del vehículo eléctrico, evitando sus mayores inconvenientes y por lo tanto donde deberían concentrarse los esfuerzos de ventas a la hora de la comercialización. De esta forma, el vehículo eléctrico iría ganando progresivamente la confianza de los consumidores y podría extenderse posteriormente a otros segmentos del mercado.

En nuestro país, la población considerada como rural se encuentra en torno al 20 % del total, como puede verse en la Figura 1. Aun considerando que no toda la población rural requiere de desplazamiento diario (por su envejecimiento o por dedicarse a actividades agrarias locales) sigue siendo una cifra considerable. Además últimamente han aparecido fenómenos de dispersión en las grandes ciudades, que podrían compensar la actual tendencia de crecimiento negativo de la población rural.

También podrían estar interesadas en el vehículo eléctrico empresas dedicadas a actividades de reparto local de mercancías ligeras. Algunas empresas podrían decantarse por aumentar su flota de vehículos eléctricos con la idea de para adquirir una imagen de marca ecológica y comprometida con el medio ambiente.



Las motocicletas y autobuses eléctricos urbanos son otras alternativas para la expansión de este mercado. Si se desarrollasen lugares y puntos para su recarga, el número de clientes interesados aumentaría considerablemente.

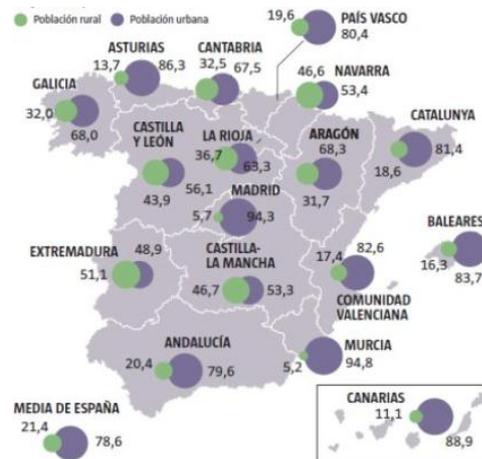


Figura 1. Porcentaje de población rural (verde) y urbana (azul) en España. Datos del 2008

Otras formas de incentivar el vehículo eléctrico serían la imposición de restricciones a la circulación y el aumento de los impuestos sobre los vehículos de combustión, aunque son medidas claramente impopulares (como cabría esperar y como también se ve reflejado en las encuestas mencionadas en el anexo *Estudio de Impacto Medioambiental*). Pese al descontento social, algunos países ya impiden a los vehículos circular un cierto día, en función del número de la matrícula. Un ejemplo de esto es el programa “Hoy No Circula” en México.

Asimismo, este mismo año se estableció temporalmente en París un sistema restrictivo similar, durante un periodo de elevada contaminación atmosférica, en el cual los vehículos eléctricos eran libres para circular. En el futuro es posible que esta práctica se vuelva más frecuente y por lo tanto tener un vehículo eléctrico se convierta en una mejor opción.

Fuera de nuestro país existen lugares con un entorno más favorable al vehículo eléctrico (y a nuestro sistema MES-AES). Por ejemplo en los Países Bajos se reúne un alto número de condiciones positivas: altos precios de la gasolina, elevados impuestos en los vehículos de combustión (hasta 3000 € anuales de impuesto de circulación), mayor infraestructura para su recarga y una larga tradición medioambiental.



Además se trata de un país pequeño, con 350 km de largo y 200 km de ancho, por lo que la falta de autonomía no resulta tan importante. Así pues, en países con características similares, el número de clientes potencial aumenta en gran medida.

Por último, para enfrentarse a los principales inconvenientes del vehículo eléctrico existen alternativas como producir vehículos eléctricos orientados exclusivamente para el transporte urbano. Con aceleraciones y velocidades máximas pequeñas y alcanzando autonomías en torno a 50 km se pueden reducir considerablemente el peso y el coste de las baterías, saliendo estos vehículos a la venta a precios mucho más asequibles.



Figura 2. Ejemplo de un vehículo diseñado para trayectos cortos (citycar)

2.2. Versatilidad del sistema MES-AES

El sistema de control para MES-AES propuesto incluye los Modos Deportivo y Escalada, los cuales permiten al vehículo funcionar mejor a velocidades altas y grandes pendientes, sin que esto se traduzca en una reducción de la vida útil de las baterías. La existencia de estos modos de funcionamiento mejora por tanto las prestaciones del vehículo y pueden ser un factor importante de cara a su venta.

El sistema MES-AES de este proyecto ha sido diseñado para un vehículo común (1400 kg), pero puede ser utilizado igualmente para otros vehículos como motocicletas, furgonetas, autobuses... Dado el caso, habría que elegir una nueva batería, apropiada para cada tipo de vehículo, variando en consecuencia el banco de supercondensadores y el resto de elementos correspondientes.

El sistema de control puede reutilizarse, simplemente habría que modificar algunos parámetros como los límites de corriente y tensión para el nuevo supercondensador y batería. Asimismo, bastaría con modificar la curva del SOC del Modo Deportivo en función de las velocidades más altas que deseemos alcanzar. Todos estos cambios realizados en el sistema de control apenas suponen tiempo y coste de diseño.



De esta forma, el sistema MES-AES es un sistema considerablemente flexible, aplicable a diferentes tipos de vehículos y capaz de adaptarse a diferentes situaciones de conducción. Debido a su considerable número de salidas comerciales, la inversión en desarrollar este sistema estaría más justificada.

3. ESTUDIO DE RENTABILIDAD

Una vez que hemos estudiado la utilidad del vehículo eléctrico, el grado en que pueden satisfacer las necesidades de los clientes y su mercado potencial a corto plazo, así como las condiciones que deben darse o desarrollarse para que su mercado se incremente, vamos a estudiar su rentabilidad.

3.1. Aspectos generales

En este estudio económico primero vamos a analizar algunos aspectos generales que afectan a la rentabilidad del vehículo eléctrico, como son las subvenciones, evolución histórica de los precios del combustible y electricidad y la existencia de la tarifa supervalle.

Posteriormente realizaremos los cálculos concretos, para conocer el ahorro económico que supone un vehículo eléctrico, el kilometraje necesario para su amortización y la viabilidad de nuestro sistema MES-AES diseñado, que vendrá dada principalmente a través del ahorro en el recambio de la batería.

3.1.1. Coste de adquisición, subvenciones y forma de pago

Los vehículos eléctricos suponen un mayor coste inicial que los convencionales. Esto se debe principalmente al alto coste de las baterías, así como a su baja tasa producción. Redondeando, el coste de adquisición de un vehículo eléctrico puede suponer unos 10.000 € más que el de un vehículo convencional.

Esto puede ser un fuerte impedimento, ya que la falta de liquidez sumada a la desconfianza en estos vehículos puede llegar a disminuir de forma importante las ventas de vehículos eléctricos, incluso si a largo plazo pudiesen ser económicamente rentables.



El alto coste de adquisición puede compensarse con las diferentes subvenciones estatales, que vienen dadas en función del tipo de vehículo, así como su autonomía. Las subvenciones que se proporcionan en España se agrupan en la Tabla 2 y 3.

Tabla 2. Subvenciones a vehículos eléctricos en función del tipo de vehículo y su autonomía. Fuente: tabla desarrollada con datos extraídos del BOE

Subvenciones vehículos eléctricos			
Turismos (M1) y Furgonetas (N1)			
Autonomía (km)	15-40	40-90	Mayor a 90
2012	2.000 €	3.500 €	6.000 €
2013	2.500 €	4.000 €	5.500 €
Autobuses o autocares (M2) y Furgones (N2) +60 km			
Autonomía (km)	15-40	40-90	Mayor a 90
2012	15.000 €		
2013	8.000 €		
Autobuses o autocares (M3) +60 km			
Autonomía (km)	15-40	40-90	Mayor a 90
2012	30.000 €		
2013	20.000 €		
Cuadriciclos ligeros L6e (2013)			1.800 €
Cuadriciclos pesados L7e (2013)			2.200 €

La mayoría de las ayudas a los diferentes sectores de la industria se han venido reduciendo con la crisis (un ejemplo claro es el de la energía fotovoltaica). Sin embargo, aunque si han disminuido en algunos casos, comparando el año 2012 y 2013 en la Tabla 2 podemos ver que las ayudas a los vehículos eléctricos siguen en su mayor parte vigentes.

Aunque las subvenciones pueden retrasarse hasta seis meses para su aprobación, podemos considerar que compensan gran parte del superior coste de adquisición de un vehículo eléctrico.

En el caso de una empresa que pidiese varias subvenciones para renovar su flota de vehículos, las cifras máximas que pueden recibir como subvención pueden verse en la Tabla 3.



Tabla 3. Subvenciones para empresas. Fuente: datos extraídos del BOE

Subvención acumulada 3 años (empresas)	
Límite máximo general	200.000 €
Sector del transporte en carretera	100.000 €
Dedicadas al sector de productos pesqueros	30.000 €
Producción de productos agrícolas	7.500 €
Transformación y comercialización de productos agrícolas	200.000 €

Otra forma de evitar el alto coste de adquisición consiste en utilizar contratos de *leasing*. De esta forma el comprador puede utilizar el vehículo (o sus baterías) un tiempo en alquiler, con un futuro derecho de compra. Esta práctica ya está siendo empleada por algunos fabricantes de vehículos eléctricos.

3.1.2. Combustible convencional y electricidad. Evolución de precios. Comparación

El petróleo es la materia prima con la que se produce el combustible que utilizan los vehículos de combustión convencionales. Aun desestimando su aspecto contaminante e incluso el problemático hecho de su futuro agotamiento, vistos ya en el anexo N°5, *Estudio de impacto medioambiental*, no podemos olvidar un aspecto económico fundamental: su aumento de precio. Una evolución de su precio desde los años 70 puede verse en la Figura 3.



Figura 3. Evolución histórica del precio del barril de crudo



Como podemos ver en la Figura 3, el precio del barril de crudo, dado su carácter limitado y la creciente demanda, sigue aumentando cada año. Además su precio a medio o largo plazo es difícil de predecir, ya que diversos eventos pueden disparar el coste del barril, o bien mantenerlo a un nivel asequible durante cierto tiempo.

En el otro lado tenemos los precios de la electricidad, con la que se alimentan las baterías de los vehículos eléctricos. Si bien un aumento de los combustibles fósiles debiera traducirse en un aumento del coste de la electricidad, ya que las centrales térmicas emplean también este tipo de combustible (petróleo, carbón o gas natural), este aumento de precio no se da en la misma medida. Afortunadamente, la energía de la red también procede de otras fuentes, como la energía nuclear y las energías renovables: eólica principalmente, y también solar e hidráulica almacenada.

Una evolución de los precios de la electricidad durante los últimos años puede verse en la Figura 4.

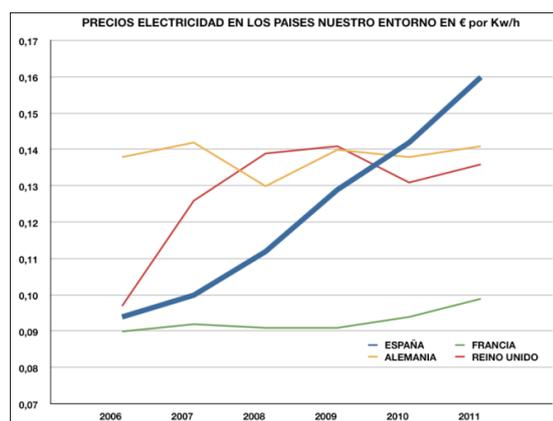


Figura 4. Evolución del precio del kWh en los principales países de la UE

Como podemos ver, el precio de la electricidad en España también ha aumentado considerablemente en los últimos años. Sin embargo, ya que el sistema MES-AES diseñado puede ser utilizado en cualquier tipo de vehículo y país, debemos de estudiar también el mercado global. Como resultado observamos que los precios no han variado tan dramáticamente en otros países (en Alemania y Francia se ha mantenido aproximadamente constante).

Si comparamos ambas evoluciones, el precio del barril de petróleo de 2006 a 2008 casi se duplicó (de 60 \$ a 120 \$, aproximadamente), mientras que el precio del kWh no ha llegado a duplicarse en un periodo mayor (2006 a 2011), ni siquiera para el caso español.



Puede ser interesante mencionar que actualmente el precio del kWh de gasolina y el kWh de electricidad no son demasiado dispares, ya que un litro de gasolina contiene unos 10 kWh (los precios del kWh para el diesel y diferentes tarifas eléctricas puede compararse con las Tablas 4 y 5). Es en realidad la mayor eficiencia del vehículo eléctrico la que permite su rentabilidad a través del ahorro en combustible (esto queda reflejado en las posteriores Tablas 5 y 6).

3.1.3. Tarifa Supervalle

La Tarifa de Último Recurso (TUR) lleva vigente desde el 1 de julio de 2009. Esta tarifa sustituyó a la anterior Tarifa Integral regulada por el gobierno, liberalizando el suministro eléctrico. De esta forma cada consumidor puede elegir y contratar la oferta de la empresa eléctrica comercializadora que más se adapte a sus necesidades, que debe ser diferente a la empresa distribuidora de la zona.

Se pueden acoger a la tarifa TUR aquellos consumidores conectados en baja tensión (hasta 1 kV) cuya potencia contratada sea inferior o igual a 10 kW, lo cual supone la mayoría de consumidores domésticos y pequeñas empresas. Aquellos consumidores que dispongan del equipo de medida adecuado podrán acogerse a modalidades con discriminación horaria, que diferencien diferentes periodos tarifarios al día (actualmente se está sustituyendo los contadores antiguos por nuevos contadores con estas capacidades).

Para promover el uso del vehículo eléctrico, con la aprobación del Real Decreto 647/2011 del 9 de mayo se crea una nueva modalidad: la Tarifa Supervalle. Esta tarifa se fundamenta en que durante el periodo en que el consumo de electricidad es menor (parte coloreada de la curva en la Figura 5), ésta se cobra a menor precio.



Figura 5. Curva habitual de la demanda eléctrica diaria. Fuente: REE



De esta forma, el aumento del número de vehículos eléctricos y su consumo en esa franja horaria (carga nocturna) ayudaría a mantener una demanda más estable, mejorando la eficiencia del sistema eléctrico, sin la necesidad de invertir en nuevas infraestructuras.

Frente a la tarifa convencional de discriminación con dos periodos, la tarifa supervalle cuenta con tres intervalos, visibles en la Figura 6.

- Periodo 1 (Punta). De la 1 del mediodía a las 11 de la noche.
- Período 3 (Supervalle). De la 1 de la madrugada a las 7 de la mañana.
- Periodo 2 (Valle). El resto del tiempo.



Figura 6. Tarifas de discriminación TUR con 2 y 3 periodos

En la tabla 4 pueden compararse los precios del kWh para cada periodo, entendiendo la diferencia en el ahorro de combustible que supondrá la Tarifa Supervalle para el usuario.

Tabla 4. Precios de los diferentes periodos tarifarios (Datos del 2º Trimestre de 2013)

Tarifas	Condiciones de aplicación	Periodo	Coste de la energía
TUR sin discriminación horaria	P<10 kW	Periodo único	0,138 €/kWh
TUR de 2 periodos	P<10 kW + Equipo de medida	Periodo 1 (Punta)	0,167 €/kWh
		Periodo 2 (Valle)	0,057 €/kWh
TUR de 3 periodos	P<15 kW* + Equipo de medida	Periodo 1 (Punta)	0,167 €/kWh
		Periodo 2 (Valle)	0,069 €/kWh
		Periodo 3 (Supervalle)	0,049 €/kWh

*Según el Real Decreto 647/2011 la tensión y la potencia con las que se puede acceder a esta tarifa supervalle se han aumentado: hasta 1 kV y 15kW.



La Tarifa Supervalde tendrá importancia en el siguiente estudio económico, ya que el menor precio del kWh ayudará a mejorar la rentabilidad del vehículo eléctrico frente al convencional. No se ha contemplado la posibilidad de que el aumento de la demanda nocturna encarecería el kWh de la tarifa supervalde, ya que la situación actual del parque eléctrico automovilístico está aún lejos de llegar a ese escenario.

3.2. Cálculos

3.2.1. Ahorro en combustible

Empezaremos calculando el ahorro en combustible que supone el vehículo eléctrico. Los consumos de energía dependerán del vehículo en cuestión con el que realicemos la comparación. Para acercarnos lo más posible a la realidad hemos tomado los datos de un vehículo eléctrico y otro diesel reales.

Para el estudio hemos tomado los datos y prestaciones de un vehículo eléctrico comercial (Nissan Leaf). Para compararlo posteriormente con un vehículo convencional hemos escogido uno de un peso similar (Nissan Qashqai). Sus respectivas masas son de 1474 kg y 1418 kg, similares a la que hemos utilizado para el diseño del sistema MES-AES.

Para el mismo trayecto, el vehículo eléctrico consume 17,3 kWh, siendo tres veces más eficiente que el vehículo de motor convencional (que consume 5 litros de diesel, lo que viene a ser unos 52,6 kWh). Para calcular el coste en la tarifa eléctrica también deberemos tener en cuenta la eficiencia del cargador a la hora de cargar las baterías (85%). A priori realizaremos los cálculos para un vehículo de vida útil moderadamente alta (hemos supuesto 200.000 km).

Los cálculos quedan resumidos en las siguientes Tablas 5 y 6.

Tabla 5. Consumo y coste del vehículo eléctrico frente al vehículo convencional

Vehículos con motor eléctrico	
kWh consumidos (100km)	17,3
η cargador	85,00%
kWh a pagar	20,4
Precio kWh eléctrico (SV)	0,05 €

Vehículo con motor convencional	
kWh consumidos (100km)	52,6
Litros combustible	5
Precio	1,40 € /litro
Precio kWh diésel	0,13 €



Como se puede ver, el precio del kWh de combustible no es muy diferente del kWh eléctrico, incluso es inferior frente a otros periodos tarifarios (revisar precios para las diferentes tarifas en la Tabla 4). Como ya se ha comentado, el principal ahorro viene dado por la mayor eficiencia del vehículo eléctrico, que según la Tabla 5 consume 17,3 kWh frente a los 52,6 kWh que consume el vehículo convencional.

Calcularemos el ahorro en combustible para la Tarifa Supervalles (SV). Siguiendo el mismo procedimiento se calcula también el ahorro recargando el vehículo exclusivamente cuando la demanda es máxima (Periodo Punta).

$$\text{Gasto en combustible} = 1,4 \frac{\text{€}}{\text{l}} \cdot 5 \text{ l} \cdot \frac{200.000 \text{ km}}{100 \text{ km}} = 14.000 \text{ €} \quad (1)$$

$$\text{Gasto electricidad (SV)} = \frac{0,05 \text{ €}}{\text{kWh}} \cdot 20,4 \text{ kWh} \cdot \frac{200.000 \text{ km}}{100 \text{ km}} = 2.035 \text{ €} \quad (2)$$

Resumiendo los resultados en la Tabla 6:

Tabla 6. Gastos en combustible y electricidad (tarifa supervalles y periodo punta)

Gastos en combustible /electricidad			
Vehículo convencional	Precio litro	100 km	200 000 km
Combustible diesel	1,40 €	7,00 €	14.000 €
Vehículo convencional	Precio kWh	100 km	200 000 km
Periodo Punta	0,17 €	3,46 €	6.920 €
Tarifa nocturna (SV)	0,05 €	1,02 €	2.035 €

Como se puede ver, incluso empleando el periodo punta (el más caro) para recargar el vehículo, se consigue reducir considerablemente el gasto frente al combustible habitual. Con la Tarifa Supervalles, el ahorro en la tarifa eléctrica y frente al combustible habitual es todavía mayor, alcanzando casi los 12.000 €, según la ecuación 3.

$$\text{Ahorro máximo} = 14.000 \text{ €} - 2.035 \text{ €} = 11.965 \text{ €} \quad (3)$$

3.2.2. Ahorro por frenado regenerativo

Continuamos con los mismos tipos de vehículos y datos de partida.



En el anexo N°3, *Estudio Justificativo de la Solución Adoptada*, se realizó una estimación del ahorro energético que suponía el frenado regenerativo, obteniendo un resultado del 20,43 %. Con este dato calculamos los kWh que vamos a ser capaces de regenerar en el frenado para el vehículo eléctrico del apartado anterior, así como su valor económico correspondiente en función de diferentes tarifas:

$$\frac{17,3 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} \cdot 20,43 \% = \frac{3,53 \text{ kWh regenerados}}{100 \text{ km}} \quad (4)$$

$$\text{Ahorro (Tarifa Supervalles)} = \frac{0,05 \text{€}}{\text{kWh}} \cdot \frac{3,53 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} \cdot 200.000 \text{ km} = 353 \text{€} \quad (5)$$

Resumiendo el ahorro proporcionado por el frenado regenerativo en forma de tabla:

Tabla 7. Cálculo del ahorro económico debido al frenado regenerativo

Ahorro por uso del frenado regenerativo			
	Precio kWh	100 km	200 000 km
Periodo Punta	0,17 €	0,60 €	1.202 €
Tarifa Supervalles	0,05 €	0,18 €	353 €

A largo plazo el ahorro de energía mediante el frenado regenerativo puede suponer hasta unos 360 € en electricidad. Puede no ser una cifra demasiado elevada, pero supone un porcentaje importante del gasto total que vamos a realizar para recargar el vehículo. Además el frenado regenerativo también permite alargar la autonomía del vehículo.

3.2.3. Diferencia en el coste de adquisición

El vehículo eléctrico comercial con el que hacemos los cálculos consume 17,3 kWh a los 100km y tiene una capacidad total de 24 kWh. Esto nos permite sobradamente recibir la subvención de **5.500 €**, para vehículos de autonomía mayores a 90 km (ver Tabla 2).

El coste de adquisición del vehículo eléctrico, incluyendo el paquete de baterías es de 33.000 €. Actualmente, el fabricante también ofrece el vehículo con las baterías en alquiler, aunque este método de compra no ha sido tenido en cuenta para el cálculo.



El coste de adquisición del vehículo convencional mencionado y usado en los cálculos anteriores es de 24.150 €. La diferencia es de 8850 €, en favor del vehículo de combustión, como se obtiene de la Ecuación 6.

$$\text{Diferencia de coste de adquisición} = 24.150 \text{ €} - 33.500 \text{ €} = -8.850 \text{ €} \quad (6)$$

Si consideremos que la subvención (5.500 €) compensa el coste de adquisición la diferencia en el coste inmediato de compra entre los dos tipos de vehículos no es tan grande (3350 €, en favor del vehículo de combustión, Ecuación 7).

$$\text{Diferencia de coste de compra} = -8.850 \text{ €} + 5.500 \text{ €} = -3.350 \text{ €} \quad (7)$$

3.2.4. Necesidad de cambio de baterías

Se estima que en 5 años o 96.000 km las baterías podrían tener un 80 % de su capacidad original. La garantía que proporciona el fabricante es precisamente de 5 años y 100.000 km. La duración de las baterías también dependerá del uso que se les dé, las temperaturas climáticas con las que se utilizan, etc.

Si el vehículo carece de un sistema MES-AES que reduzca la corriente por las baterías, a partir de 5 años la pérdida de la capacidad original de las baterías podría superar el 20 %. El usuario podría seguir usando la batería original, pero deberá realizar un mayor número de recargas semanales y aquellos trayectos de longitud media (con ida y vuelta) elevarán el riesgo de quedarse sin energía en mitad del trayecto.

Por todo esto, hemos considerado que durante la vida útil de nuestro vehículo (200.000 km) será necesario cambiar al menos 1 vez la batería. Cambiar la batería módulo a módulo es caro, sin embargo el recambio del paquete completo es de unos 7000 €.

➤ Balance final. Resultados

En este apartado realizaremos la comparación de los costes y ahorros del vehículo eléctrico frente al convencional sin tener en cuenta el sistema MES-AES, usando los resultados de los apartados anteriores.



Utilizaremos el ahorro de combustible obtenido en la Ecuación 3, el ahorro por frenado regenerativo obtenido en la Ecuación 4, el coste de adquisición de la Ecuación 6, así como la subvención correspondiente en la Tabla 2 y el coste de recambio de la batería. De esta forma el balance final es el siguiente:

Tabla 8. Balance de la rentabilidad del vehículo eléctrico sin sistema MES-AES

	Vehículo Eléctrico VS Convencional
Ahorro en combustible (Supervalle)	11.965 €
Ahorro por frenado regenerativo	353 €
Diferencia de Coste de adquisición	-8.850 €
Subvención	5.500 €
1 Cambio de batería	-7.000 €
Total	1.968 €

Así pues, aun necesitando un cambio de batería y a pesar de su elevado coste de adquisición el vehículo eléctrico puede ser rentable a largo plazo, gracias a las subvenciones y principalmente al ahorro en combustible.

Además, no hemos tenido en cuenta los siguientes aspectos, favorables todos ellos al vehículo eléctrico, los cuales podrían aumentar su rentabilidad ligeramente:

- El coste de recambio del paquete de baterías podría verse reducido dentro de unos años, cuando la tecnología se encuentre más avanzada.
- Valor residual de las baterías, que podrían tener segundos usos, como se explica en el anexo N°5, *Estudio de impacto medioambiental*.
- Costes de mantenimiento del vehículo convencional, superiores al eléctrico.
- Otras consideraciones. Exención del impuesto de circulación para vehículos eléctricos, exención del pago por aparcar en zonas reguladas u otros gravámenes futuros para vehículos de combustión.

➤ **Amortización**

Vamos a hacer un cálculo semejante al anterior, para saber cuántos kilómetros debemos hacer como usuario del vehículo eléctrico para que nuestra compra comience a salir rentable.



Tabla 9. Suma monetaria a amortizar en combustible a lo largo de la vida útil del vehículo

	Vehículo Eléctrico VS Convencional
Diferencia de Coste de adquisición	-8.850 €
Subvención	5.500 €
1 Cambio de batería	-7.000 €
Total a amortizar	-10.350 €

El ahorro por kilómetro será la diferencia entre el coste por km del combustible convencional y el coste por kilómetro de la electricidad, teniendo en cuenta la energía regenerada por frenado.

Tabla 10. Vehículo eléctrico. Ahorro económico por kilómetro

	200.000 km	Coste/ahorro por km (c€)
Combustible convencional	14.000 €	7,00
Electricidad (supervalle)	2.035 €	1,02
Frenado regenerativo	353 €	0,18
Ahorro total por km		6,16 c€

Por lo tanto los kilómetros necesarios para que el vehículo eléctrico comience a ser rentable son los siguientes:

$$\frac{10.350\text{€}}{6,16\text{c€/km}} = 168.000 \text{ km} \quad (8)$$

Esta distancia deberá recorrerse en un tiempo no demasiado largo (10 años), para que no se requiera adquirir una 3ª batería, ya que entonces la rentabilidad y distancia para la amortización varían. La distancia media diaria que debe realizar el usuario para hacer rentable el vehículo eléctrico se encuentra en la Tabla 12.



4. RENTABILIDAD. MES-AES DISEÑADO FRENTE AL SISTEMA MES HABITUAL

Acabamos de calcular que, mediante las subvenciones y el ahorro de combustible, incluso siendo necesario un cambio de la batería, el vehículo eléctrico puede salir rentable a largo plazo (a partir de 168.000 km). A continuación veremos si el sistema diseñado puede reforzar la rentabilidad del vehículo eléctrico.

Como ya hemos dicho, es difícil estimar el aumento de ventas de vehículos eléctricos debidos a la incorporación de un sistema AES al sistema MES habitual. Por ello, ya que la incorporación del sistema AES alarga la vida útil de las baterías y evita su sustitución en al menos una ocasión, consideraremos que nuestro proyecto es viable si el coste de fabricación del sistema AES es menor al coste de una batería.

Estimaremos que el volumen de ventas del sistema AES complementando al sistema MES es de al menos 1000 unidades, cifra que no es demasiado elevada en comparación a las ventas anuales de vehículos. Con estas ventas los costes de diseño quedan reducidos considerablemente:

$$\frac{\text{Costes de diseño}}{n^{\circ} \text{ unidades}} = \frac{14.500\text{€}}{1000 \text{ unidades}} = 14,50 \text{ €/unidad} \quad (9)$$

Recalculamos el presupuesto con el resultado de la ecuación 9, incluyendo también las rebajas por la compra de los componentes más importantes en mayores cantidades, así como reduciendo los costes de montaje. En la Tabla 11, comparamos el nuevo coste del sistema AES con el coste de recambio de una batería:

Tabla 11. Sistema AES diseñado. Mejora de la rentabilidad del vehículo eléctrico

Coste de recambio de la batería	7.000,00 €
Nuevo Presupuesto de Ejecución Material (PEM) Sistema AES // 1000 unidades	6.510,44 €
Mejora Económica	489,56 €

El resultado es positivo, el sistema MES-AES puede resultar una mejor alternativa económica al cambio de batería.

Sin embargo, la diferencia no es muy alta y el coste inmediato de adquisición del vehículo se eleva (ya que el sistema AES se adquiere en la primera compra mientras



que la 2ª batería se adquiere tras varios años). Ante este margen de beneficio tan ajustado tenemos los siguientes factores a favor de nuestro diseño:

1. El sistema MES-AES no solo evita el recambio de una batería, sino que también mejora el rendimiento del vehículo eléctrico.

En el anexo N°11, *Simulaciones y validación del algoritmo* se calculó que el vehículo funcionando exclusivamente con batería tenía un rendimiento del 87,5 % mientras que el vehículo que emplea el sistema MES-AES alcanza un rendimiento del 96,1 % durante aceleraciones y frenados. Además el rendimiento también será superior durante la marcha normal, ya que al someter a esfuerzos menores a las baterías estas se calientan menos y su resistencia interna es menor.

Resumiendo, el aumento del rendimiento supondrá un ahorro mayor en la tarifa eléctrica. Se ha estimado que el ahorro mínimo por este hecho sería de otros 200 €, lo que supone un ahorro total superior a **689,56 €**. En definitiva, el sistema MES-AES tarda menos kilómetros en amortizarse (157.000 km, en comparación al resultado de la Ecuación 8).

2. En el aspecto práctico, al tener un mayor rendimiento, el vehículo con sistema MES-AES puede recorrer una distancia ligeramente mayor desde el primer día. Además, el vehículo con sistema MES-AES mantiene una autonomía alta durante mayor parte de su vida útil, y no tan solo durante los primeros años tras un cambio de batería.
3. En el aspecto comercial, el sistema MES-AES puede alcanzar mejores prestaciones de aceleración sin dañar las baterías (especialmente si se emplea el modo Deportivo y Escalada), aspecto importante de cara a su venta.
4. El sistema MES-AES somete sus baterías a un menor esfuerzo, por lo que eventualmente sufrirá menos averías. Además, como ya hemos explicado, su autonomía es mayor y más estable. Todo esto conduce a que el usuario confíe más en este sistema, siendo la confianza del usuario uno de los factores que el vehículo eléctrico debe conquistar.
5. El vehículo eléctrico que emplea un sistema MES-AES está orientado a tener una vida útil mayor al que emplea únicamente sistema MES (solo baterías).



Por ejemplo, en el caso de que a los 10 años la 2ª batería empezase a perder capacidad, el usuario con sistema MES podría preferir comprar un nuevo vehículo a gastar su dinero en una nueva 3ª batería.

En cambio, como el sistema MES-AES no requiere de tantos cambios de batería y mantiene una mayor autonomía es probable que se utilice por más tiempo. Por lo tanto, son necesarios muchos menos kilómetros diarios y es mucho más fácil amortizar el sistema MES-AES, como se ve en la Tabla 12.

Tabla 12. MES-AES como sistema más fácil de amortizar

	Vida útil (años)	km para amortizar	km diarios
Vehículo con sistema MES (solo batería)	10	168.045	46
Vehículo con sistema MES-AES	12	156.849	36

Así pues, podemos considerar el sistema MES-AES diseñado superior al sistema MES habitual en la mayoría de los aspectos.

5. CONCLUSIONES

El alto coste de adquisición de un vehículo eléctrico se ve amortiguado por las subvenciones. De esta forma, el coste inmediato del vehículo eléctrico no es demasiado superior al de un vehículo convencional.

A largo plazo el vehículo eléctrico sale rentable, aunque no por una cifra demasiado holgada. Para que tanto el vehículo eléctrico como el sistema MES-AES fuesen ampliamente rentables habría que fabricarlos en mayores volúmenes, así como esperar un descenso de los precios de baterías y supercondensadores.

Incluyendo el sistema MES-AES diseñado, el coste de adquisición del vehículo se eleva, aunque la rentabilidad a largo plazo aumenta ligeramente. También se consigue mejorar en una pequeña proporción las prestaciones y utilidad del vehículo eléctrico.

También se han estudiado diversos factores, como la evolución de los precios de la gasolina y la electricidad, así como otros aspectos del entorno que apuntan a un



aumento futuro de la rentabilidad y demanda del vehículo eléctrico, por lo que la inversión en el sector estaría justificada.

Todo lo anterior puede compensar la compra de un vehículo eléctrico, al menos en el aspecto económico y medioambiental. Sin embargo, en el aspecto funcional, los vehículos eléctricos siguen teniendo una baja autonomía y largo tiempo de recarga, limitándolo a trayectos cortos y uso urbano. Estas prestaciones siguen llevando al consumidor a rechazar el vehículo eléctrico, incapaz de realizar viajes largos de la forma habitual.

Por lo tanto, el primer paso estará en dotar al vehículo eléctrico de un sistema más fiable y con mayor autonomía, que pueda ganarse la confianza y aceptación de los usuarios. El sistema MES-AES diseñado mejora en este aspecto frente al sistema MES habitual, pero sigue estando lejos de las prestaciones proporcionadas por los vehículos convencionales.

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE BURGOS**



SISTEMA MES-AES PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

BIBLIOGRAFÍA

AUTOR:

Fernando González Campo

TUTOR:

Carmelo Lobo de la Serna

JUNIO de 2014



1. ESTUDIO PREVIO

1.1. Anexo N°1. Introducción a los vehículos híbridos y eléctricos

- Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle: Implementation and Evaluation Micah Ortúzar, *Member, IEEE*, Jorge Moreno, *Member, IEEE*, and Juan Dixon, *Senior Member, IEEE*.
- Guía para la promoción del vehículo eléctrico en las ciudades – Movele.
- El vehículo eléctrico: tecnología, desarrollo y perspectivas de futuro / Francisco Trinidad López... [et al.]
- Mapa Tecnológico Movilidad Eléctrica IDEA.

1.2. Anexo N°2. Estudio de la problemática en las baterías de ión-litio

- Charging Li-ion Batteries for Maximum Run Times, By Scott Dearborn, Principal Applications Engineer, Microchip Technology, Chandler, Ariz.
- Acumuladores electroquímicos: fundamentos, nuevos desarrollos y aplicaciones / José Fullea García.
- Electric Vehicle Charge Optimization Including Effects of Lithium-Ion Battery Degradation. Anderson Hoke, Alexander Brissette, Dragan Maksimović University of Colorado, Boulder. Annabelle Pratt Intel Labs. Kandler Smith National Renewable Energy Laboratory
- <http://www.bateriasdelitio.es/>
- <http://www.ptelectronics.es/index.php/menubaterias/menucaracteristicas>
- <http://www.tecmovia.com/2012/03/14/baterias-de-coches-electricos-e-hibridos-hoy-estado-de-la-tecnologia-del-automovil/>



1.3. Anexo N°3. Estudio justificativo de la solución a adoptar

- <http://hectevi.blogspot.com.es/2013/10/frenado-regenerativo-aprovechamiento-de.html>
- <http://www.tecmovia.com/2012/09/17/enemigos-de-la-eficiencia-la-resistencia-a-la-rodadura/>
- <http://www.tecmovia.com/2011/11/27/enemigos-de-la-eficiencia-la-resistencia-aerodinamica/>
- http://www.eco-aesc-lb.com/en/product/liion_ev/
- http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_sal_fundida
- <http://news.rpi.edu/luwakkey/2810>
- Flywheel energy and power storage systems Bjorn Bolund, Hans Bernhoff, Mats Leijon Department of Engineering Sciences, Uppsala University, The Angstrom Laboratory, Box 534, S-75121, Uppsala, Sweden
- Theory and Application of Superconducting Magnetic Energy Storage. Ju Wen, Jian X. Jin Center of Applied Superconductivity and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China. You G. Guo, Jian G. Zhu Faculty of Engineering, University of Technology, Sydney, PO Box 123, Broadway, NSW 2007, Australia.

1.4. Anexo N°4. Supercondensadores

- Ultracapacitors + DC-DC Converters in Regenerative Braking System Juan W. Dixon & Micah E. Ortúzar Catholic University of Chile
- http://www.conacoco.com.mx/comite/carbon_activado_comite.htm
- http://centrodeartigos.com/articulos-de-todos-los-temas/article_22500.html



- <http://www.tecategroup.com/ultracapacitors-supercapacitors/ultracapacitor-FAQ.php>
- http://www.garmanage.com/atelier/index.cgi?path=public&B&Energy_storage&B&Supercapacitors&B&Efficiency&&id=psyitefg
- <http://www.maxwell.com/>
- Monitoring System for Testing the Performance of an Electric Vehicle Using Ultracapacitors. Juan W. Dixon, Micah Ortúzar and Jorge Moreno.
- Síntesis de xerogeles de carbon inducida por microondas para su uso como electrodos en supercondensadores. Esther Gómez Calvo. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Oviedo.

1.5. Anexo N°5. Estudio de impacto medioambiental

- <https://www.endesavehiculoelectrico.com/>
- <http://cronicaeconomica.com/articulo.asp?idarticulo=27377>
- <http://www.minas.upm.es/investigacion/co2/cambioClimatico.EWorld.htm>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Emisiones_de_CO2
- http://es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo_el%C3%A9ctrico
- <http://www.motorpasionfuturo.com/industria/el-precio-del-litio-podria-bajar-gracias-a-nuevos-metodos-de-produccion>
- <http://www.unr.edu.ar/noticia/5765/la-extraccion-del-litio>
- http://www.mtuamotera.org/gn/web/noticia_desarrollada.php?cod=1338
- <http://www.desarrollosostenible.es/smog-causas-y-efectos.html>
- <http://www.ree.es/es/>



- <https://energeticafutura.com/blog/proyecto-reve-regulacion-eolica-con-vehiculos-electricos/>
- <http://ocio.elnortedecastilla.es/motor/sistema-de-nissan-para-transferir-electricidad-del-coche-la-casa-01062012.html>
- <http://webs.uvigo.es/albertogonzalez/>
- <http://www.ecologistasenaccion.org/article20334.html>
- Directiva 91/157/CEE, relativa a pilas y acumuladores
- Directiva RoHS

2. APLICACIÓN PRÁCTICA

2.1. Anexo N°6. Solución adoptada para el sistema de potencia

- Energy Management System for an Hybrid Electric Vehicle, Using Ultracapacitors and Neural Networks. Jorge Moreno (Student Member IEEE), Juan Dixon (Senior Member IEEE) and Micah Ortúzar (Student Member IEEE). Department of Electrical Engineering Pontificia Universidad Católica de Chile
- Análisis y diseño de un control basado en pasividad de un convertidor tipo Buck/Boost a vehículos eléctricos. CENIDET

2.2. Anexo N°7. Convertidores CC/CC para sistema MES-AES.

- ELECTRONICA DE POTENCIA. CONVERTIDORES DE CC/CC. Carmelo Lobo de la Serna



2.3. Anexo N°8. Desarrollo del sistema de potencia

- http://www.eco-aesc-lb.com/en/product/liion_ev/
- <http://es.mouser.com/>
- Tesis: DESIGN, IMPLEMENTATION AND EVALUATION OF AN AUXILIARY ENERGY SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES, BASED ON ULTRACAPACITORS AND BUCK-BOOST CONVERTER, MICAH E. ORTÚZAR

2.4. Anexo N°9. Análisis de las estrategias de control

- Modelado y Control de Convertidores Electrónicos de Potencia Estrategias de Modulación y Control. Gabriel Eirea. Instituto de Ingeniería Eléctrica. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República
- MODELADO Y DISEÑO DEL CONTROL DEL CONVERTIDOR REDUCTOR- ELEVADOR EN MODO CORRIENTE DE PICO. Marlee Nathalie Basurto Macavilca. DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

2.5. Anexo N°10. Desarrollo del algoritmo de control

- DSP Based Ultracapacitor System for Hybrid-Electric Vehicles. Juan W. Dixon. Department of Electrical Engineering Pontificia Universidad Católica de Chile. Micah Ortúzar and Jorge Moreno. Department of Electrical Engineering Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Regenerative Braking for an Electric Vehicle Using Ultracapacitors and a Buck-Boost Converter. Juan W. Dixon, Micah Ortúzar and Eduardo Wiechmann*Department of Electrical Engineering. Catholic University of Chile. *University of Concepción



2.6. Anexo N°11. Simulaciones y validación del algoritmo

- <http://www.tecmovia.com/2011/10/19/potencia-y-par-motor-electrico-y-diesel-cultura-general-para-el-s-xxi/>

2.7. Anexo N°13. Circuitos de acondicionamiento y control

- <http://www.semikron.com/>
- <http://www.angelsaenz.com/angelsaenz/de/parametros.asp?nombre=2175&cod=2175&sesion=1>

3. PLIEGO DE CONDICIONES

- http://www.ups.com/media/news/es/ar/intl_lithium_battery_regulations.pdf
- <http://www.statefundca.com/safety/safetymeeting/SafetyMeetingArticle.aspx?ArticleID=145>

4. VIABILIDAD ECONÓMICA

- Boletín Oficial del Estado. Núm. 101. Sábado 27 de abril de 2013.
- <http://www.motorpasionfuturo.com/coches-electricos/los-paises-bajos-se-convierten-en-el-campo-de-pruebas-para-los-coches-electricos>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Hoy_no_circula
- <http://www.recargacocheselectricos.com/alemania-coche-electrico-desde-5-000-euros/>
- <http://www.enlazandoalternativas.org/spip.php?article228>
- <http://educacionenergeticavallalbaida.blogspot.com.es/2012/04/evolucion-de-los-precios-del-mercado.html>



- <http://www.lugenergy.com/recarga-coche-moto-electrica/tarifa-supervalle/>
- <http://www.recargacocheselectricos.com/comparacion-coche-electrico-con-coche-gasolina/>
- <http://www.automocionblog.com/tag/precio+baterias+nissan+leaf>
- <http://www.autobild.es/coches/nissan/qashqai>
- <http://www.motorpasionfuturo.com/coches-electricos/sustituir-las-baterias-del-nissan-leaf-parece-que-es-caro>
- <http://www.tecmovia.com/2011/10/01/nissan-despeja-algunas-dudas-y-abre-otras-sobre-duracion-y-coste-de-sus-baterias/>